

05

Применение метода ионно-пучкового травления свободновисящих пленок для разработки пленочных корректоров экстремального ультрафиолетового диапазона длин волн

© Н.Н. Цыбин, Е.Б. Ключенков, А.Я. Лопатин, В.И. Лучин, А.Е. Пестов, Н.И. Чхало

Институт физики микроструктур РАН,
603950 Нижний Новгород, Россия
e-mail: tsybin@ipmras.ru

Поступило в Редакцию 26 апреля 2024 г.
В окончательной редакции 26 апреля 2024 г.
Принято к публикации 26 апреля 2024 г.

Предложена методика создания свободновисящих пленочных элементов, предназначенных для коррекции аберраций волнового фронта излучения в оптических схемах с рабочей длиной волны в спектральной области мягкого рентгеновского и экстремального ультрафиолетового диапазонов. Изготовлены образцы пленочных структур, служащих исходной основой при формировании фазовых корректоров с характерной величиной модуляции фазы, соответствующей оптической разности хода ~ 1 nm на длине волны 13.5 nm, и с однородным по апертуре пропусканием не менее 60%. Продемонстрирована возможность использования ионного травления для локального изменения толщины свободновисящих многослойных пленок.

Ключевые слова: многослойные свободновисящие пленки, корректор волнового фронта, ионно-пучковое травление, мягкий рентгеновский и экстремальный ультрафиолетовый диапазон длин волн.

DOI: 10.61011/JTF.2024.07.58337.144-24

Введение

Для достижения дифракционного предела разрешения оптической схемы (системы многослойных рентгеновских зеркал в мягком рентгеновском (МР) и экстремально ультрафиолетовом (ЭУФ) диапазоне длин волн) необходимо иметь точность волнового фронта лучше некоторого уровня, определяемого обычно по критерию Марешаля [1]. Согласно данному критерию, среднеквадратическая аберрация волнового фронта оптической системы RMS (root mean square) должна удовлетворять соотношению $RMS \leq \lambda/14$, где λ — рабочая длина волны. Для оптических схем проекционной литографии, работающих на длине волны 13.5 nm, в силу их специфики (частично когерентного освещения и жестких требований к форме и точности положения полос формируемого на резисте изображения) критерия Марешаля уже недостаточно и требуется, чтобы среднеквадратическое отклонение формы волнового фронта от идеального было на уровне $\lambda/50$ [2] — это гарантирует, что остаточные аберрации не окажут заметного влияния на величину глубины фокуса и достигаемое разрешение. Таким образом, требования к допустимому отклонению формы зеркал в литографических машинах находятся на субнанометровом уровне по среднеквадратическому отклонению (0.06 nm для шести зеркальной проекционной системы).

Достижение столь высоких точностей — непростая технологическая задача. И потому практически неизбежно появление неточностей в профиле рабочей поверхности и взаимном позиционировании зеркал (да-

лее ошибок), ведущих к постоянному или временному искажению формы волнового фронта. Это могут быть ошибки формы зеркал, допущенные при изготовлении подложек, или появившиеся после нанесения на них многослойного покрытия (из-за внутренних напряжений в покрытии). Также причинами появления искажений волнового фронта могут стать изменения формы отдельных зеркал (из-за нагрева или неправильного крепления), неточности позиционирования зеркал. Некоторые ошибки удается убрать за счет подстройки систем крепления и положения зеркал или другими доступными способами (например, селективным нагревом зеркала [3]), оставшиеся же ошибки можно попытаться исправить с использованием корректоров волнового фронта.

Ранее был предложен метод коррекции локальных искажений волнового фронта в оптической системе путем удаления части отражающего покрытия многослойного зеркала с помощью ионного распыления (ion milling) [4,5]. За счет удаления части отражающего покрытия (некоторого количества периодов), отраженное излучение получает дополнительный набег фаз (в случае, когда действительная часть показателя преломления многослойной структуры на рабочей длине волны $n < 1$), так как по сравнению с излучением, отраженным соседними участками, часть пути будет проходить в вакууме. Если же нужно уменьшить набег фаз, то можно локально увеличить толщину зеркального покрытия (при $n < 1$), напылив поверх покрытия нужное количество дополнительных периодов. Такой подход позволяет вносить локальное изменение в распределение фазы фронта отраженного от многослойного покрытия

излучения при сохранении распределения по амплитуде. Последнее выполняется в том случае, если исходное количество периодов в покрытии достаточно велико, так что величина коэффициента отражения слабо зависит от их числа [5], а, следовательно, удаление некоторого числа периодов почти не сказывается на отражательных характеристиках покрытия. Таким образом, метод эффективен, если требуется исправить постоянное, небольшое по величине искажение волнового фронта в оптической системе. Однако у него имеются и недостатки, связанные с необходимостью для проведения коррекции (локального ионного распыления или напыления дополнительных слоев) снимать зеркало с покрытием и устанавливать его заново. Кроме того, дополнительные сложности могут быть связаны с использованием на поверхности зеркальных покрытий влияющего на величину набега фаз защитного слоя, который нужно в месте коррекции сначала удалить, а потом нанести заново.

Более простой и удобный, не требующий извлечения зеркала, метод коррекции волнового фронта — добавление в оптическую схему работающего на просвет корректора в виде неоднородной по толщине свободно-висящей пленки [6]. Пленочный корректор может быть выполнен в двух вариантах и состоять из одной или двух отдельных пленочных структур, задающих необходимое распределение фазового сдвига („фазовая“ часть — ФЧ) и компенсирующих изменение в распределении интенсивности, появляющееся после прохождения излучения „фазовой“ части („амплитудная“ часть — АЧ). Так как прозрачных материалов в МР и ЭУФ диапазонах нет, то проходящее через пленочный корректор излучение будет поглощаться, что является недостатком этого метода коррекции. Чтобы поглощение в пленочном корректоре было минимально, необходимо выбирать наиболее прозрачные на рабочей длине волны материалы и минимизировать его толщину.

Еще одним недостатком пленочных корректоров является хрупкость свободно-висящих тонких пленок. Так как чем толще свободно-висящая пленка, тем она, как правило, прочнее, то для изготовления пленочных корректоров с высоким коэффициентом пропускания предпочтительно, чтобы ФЧ и АЧ были объединены в единую структуру. В этом случае также отпадает необходимость точного ориентирования ФЧ и АЧ пленочного корректора друг относительно друга.

Однородные по толщине свободно-висящие пленки используются во многих приложениях МР и ЭУФ спектрального диапазона в качестве абсорбционных спектральных фильтров, поляризаторов и фазовращателей на просвет, защитных пленок для маски в установках проекционной ЭУФ литографии [7–10]. Однако пленочный корректор представляет собой неоднородную по толщине пленку. Чтобы добиться нужного распределения материала по апертуре свободно-висящей пленки, можно еще на этапе осаждения пленок на подложку нанести пленку с требуемым распределением по толщине (используя для этого, например, устанавливающиеся над

магнетронами фигурные диафрагмы специальной формы). Также можно изначально изготовить однородную по толщине заготовку под корректор (свободно-висящую пленку), а требуемое распределение по толщине получить путем локального удаления части материала свободно-висящей пленки, например, с помощью травления ионным пучком. Первый подход проще использовать, если требуется, чтобы в некоторых местах пленка была утолщена, в то время как ионным травлением проще создавать локальное утонение пленки. Для изготовления пленочного корректора предполагается в будущем совместить эти подходы. В настоящей статье мы рассмотрим возможности по использованию ионно-пучкового травления для создания локального утонения (однородного или градиентного) на заготовках для пленочных корректоров.

1. Выбор материалов для пленочного корректора

Выбор материалов для ФЧ и АЧ корректора определяется как оптическими константами на рабочей длине волны, так и возможностью из этих материалов изготовить пленочный корректор. В настоящей работе мы рассматривали варианты пленочных корректоров на рабочую длину волны 13.5 nm. Выбор длины волны обусловлен тем, что оптика дифракционного качества, в первую очередь, используется в схемах ЭУФ литографии. В настоящее время рассматриваются к реализации проекты как традиционной — с использованием отражательной маски, так и безмасочной проекционной литографии на длине волны 13.5 nm [11]. В случае, если в России будет запущена программа по развитию ЭУФ литографии в более коротковолновой области (наиболее перспективные варианты — с рабочими длинами волн 6.6 или 11.2 nm [12]), то перенести приведенный здесь подход на эти длины волн не составит труда.

Рассмотрим двухслойный пленочный корректор, в некоторой области которого создан линейный градиент по толщине (как в ФЧ, так и для выравнивания интенсивности — в АЧ) (рис. 1).

Разность хода Δ_{12} , соответствующая набегу фаз на конкретной длине волны между областями с разной толщиной „фазовой“ и „амплитудной“ части, можно вычислить, зная оптические константы материалов:

$$\begin{aligned} \Delta_{12} = \Delta - \Delta^* &= (1 - n_1) \cdot d_1 + (1 - n_2)d_2 \\ &- (1 - n_1)d_1^* - (1 - n_2)d_2^* \approx (1 - n_1) \cdot (d_1 - d_1^*). \end{aligned} \quad (1)$$

Символом „*“ здесь обозначены величины, которые относятся к лучу, проходящему через пленочный корректор в той области, где толщины слоев отличны от исходных (рис. 1). В выражении (1) мы пренебрегли двумя слагаемыми, так как очевидно, что АЧ, чтобы не вносить фазовых искажений, должна иметь действительную часть показателя преломления близкой к

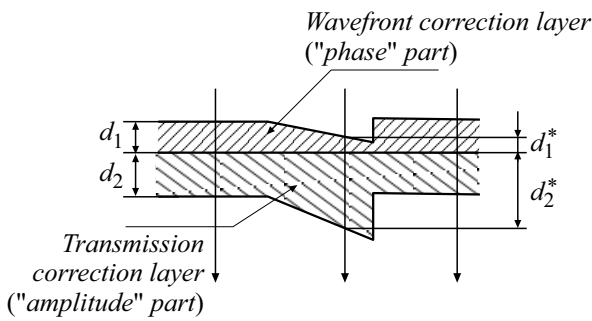


Рис. 1. Схематическое изображение пленочного корректора волнового фронта ЭУФ диапазона с линейной зависимостью фазового сдвига от координаты и с выровненной по апертуре прозрачностью.

единице ($n_2 \approx 1$). С учетом того что в ЭУФ диапазоне длин волн коэффициент отражения при нормальном падении от слоя мал, можно показать, что теоретически максимальный коэффициент пропускания двухслойного корректора для заданного набега фаз определяется следующим выражением:

$$T_{\max} = \exp(-\Delta_{12} \cdot 4\pi/\lambda \cdot 1/[(1-n_1)/k_1 - (1-n_2)/k_2]), \quad (2)$$

где n_1, n_2, k_1, k_2 — действительные и мнимые части показателя преломления.

Максимальный коэффициент пропускания (при заданном набеге фаз) соответствует случаю, когда в одном месте пленки есть только ФЧ, а в соседнем — только АЧ, что, очевидно, на практике не реализуемо. То есть максимальный коэффициент пропускания пленочного корректора будет заведомо меньше T_{\max} . Но формула позволяет выбрать оптимальные материалы для двухслойного корректора. Как видно, наибольший коэффициент пропускания корректора достигается, когда разность $[(1-n_1)/k_1 - (1-n_2)/k_2]$ максимальна. В табл. 1 приведены заимствованные из [13] значения действительной n и мнимой k части показателя преломления на длине волны 13.5 nm и соотношение $(1-n)/k$ для наиболее часто используемых при изготовлении пленок материалов, обладающих относительно низким коэффициентом поглощения на длине волны 13.5 nm.

Из таблицы видно, что на длине волны 13.5 nm в качестве АЧ нужно использовать кремний, а в качестве пары, которая обеспечивает наибольшее пропускание при требуемом набеге фаз — Nb–Si. Зная величину требуемого набега фаз, можно также определить и минимальные толщины материалов:

$$d_2^{\min} \cdot k_2 = d_1^{\min} \cdot k_1 = \Delta_{12}/[(1-n_1)/k_1 - (1-n_2)/k_2]. \quad (3)$$

Примеры расчетов параметров для некоторых пар, обеспечивающих набег фаз, соответствующей разности хода в 1 nm, приведены в табл. 2.

Таблица 1. Значения действительной n и мнимой k частей показателя преломления и отношение $(1-n)/k$ для некоторых материалов на длине волны 13.5 nm [13]

| Материал | n | k | $(1-n)/k$ |
|-------------------|-------|---------|-----------|
| Si | 0.999 | 0.00183 | 0.546 |
| B ₄ C | 0.96 | 0.00572 | 6.993 |
| SiC | 0.982 | 0.00481 | 3.742 |
| Mo | 0.924 | 0.00645 | 11.783 |
| Nb | 0.932 | 0.0053 | 12.830 |
| Zr | 0.959 | 0.00377 | 10.875 |
| Ru | 0.887 | 0.017 | 6.647 |
| MoSi ₂ | 0.969 | 0.00434 | 7.143 |
| NbSi ₂ | 0.971 | 0.0038 | 7.632 |
| ZrSi ₂ | 0.979 | 0.00321 | 6.542 |

Таблица 2. Рассчитанные по формулам (2) и (3) и данным из табл. 1 величины максимального коэффициента пропускания на длине волны 13.5 nm и соответствующих (минимальных) толщин слоев ФЧ и АЧ двухслойных пленочных корректоров, способных теоретически обеспечить набег фаз, соответствующей разности хода в 1 nm

| Пара материалов (1-й–2-й) | $T_{\max}, \%$ | d_1^{\min}, nm | d_2^{\min}, nm |
|---------------------------|----------------|-------------------------|-------------------------|
| Nb–Si | 92.7 | 15.36 | 44.48 |
| Mo–Si | 92.05 | 13.8 | 48.63 |
| Zr–Si | 91.38 | 25.68 | 52.9 |
| Mo–ZrSi ₂ | 83.73 | 29.6 | 59.5 |
| Zr–ZrSi ₂ | 80.67 | 61.2 | 71.9 |

Конечно, при выборе материалов для пленочного корректора стоит учитывать и технологические возможности изготовления пленок данного состава, их механические свойства, стойкость к окислению, а также, возможно, термическую стойкость (последнее важно в случае, если сквозь пленочный корректор будет проходить излучение большой мощности). Так как многослойные структуры могут обладать более высокой прочностью, чем однослойные [14], в качестве заготовок для пленочных корректоров использовались многослойные (состоящие из чередующихся пар нанометровых толщин слоев) структуры. Еще одно преимущество многослойных структур состоит в том, что за счет выбора состава и толщины слоев можно при необходимости попытаться изменить (уменьшить) величину внутренних напряжений в пленке. Большие по величине внутренние напряжения в пленке нежелательны, так как они могут приводить к скручиванию пленки на этапе ее отделения от подложки или даже к повреждению (при превышении предела прочности). В настоящей работе представлены образцы заготовок под пленочные корректоры, у которых многослойной является либо только ФЧ, либо ФЧ и АЧ одновременно.

2. Методы исследования

Однородные по толщине свободновисящие многослойные пленочные структуры (заготовки под пленочные корректоры) изготавливались по развитой нами ранее методике [8]. Методом магнетронного напыления на кремниевые полированные пластины диаметром 100 mm осаждался подслой (слой Y) и многослойная структура корректора. В некоторых случаях затем на поверхность нанесенной на подложку многослойной структуры дополнительно наносился упрочняющий полимерный слой толщиной около 100 nm. Полимерный слой использовался для придания пленке дополнительной механической прочности, чтобы избежать ее повреждения на этапе отделения от подложки. Полимерный слой на последнем этапе удалялся окунанием образцов в толуол или посредством фотодеструкции компонентов полимера под воздействием ультрафиолетового света на воздухе в течение нескольких часов (использовались ртутные лампы). При изготовлении свободновисящей структуры подслой растворялся в селективном травителе (водном растворе соляной кислоты), а отделенная от подложки пленка высаживалась на полированные кольца из нержавеющей стали, либо на кремниевые рамки с отверстием диаметром до 80 mm (рис. 2).

Для экспериментов также изготавливались натянутые на оправе пленки. Для этого выловленная на кремниевую рамку свободновисящая пленка натягивалась за счет добавления клея по внутреннему периметру кольца оправы (по границе с пленкой). К натянутой пленке далее, путем приведения в контакт, приклеивались оправы с нанесенным на их поверхность эпоксидным клеем. Натянутая пленка более устойчива к внешним воздействиям, а потому имеет больше шансов избежать

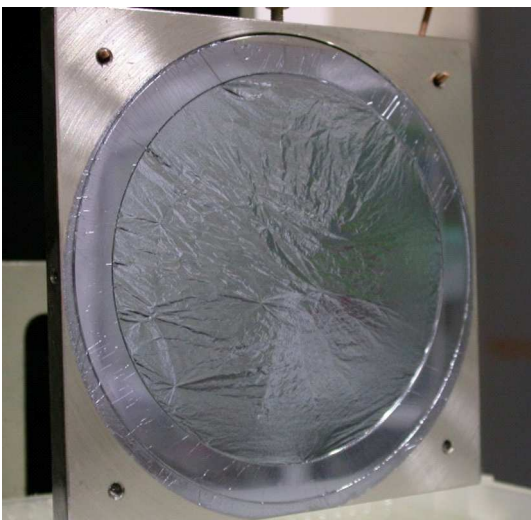


Рис. 2. Выловленная на закрепленную в держателе кремниевую рамку с отверстием диаметром 80 mm заготовка под пленочный корректор состава $(Zr-3 \text{ nm}/ZrSi_2-1.5 \text{ nm}) \times 10 + (Si-2.5 \text{ nm}/ZrSi_2-0.7 \text{ nm}) \times 20$, на поверхность которой нанесен упрочняющий полимерный слой.

повреждения в процессе помещения образца в вакуумный объем и откачки из объема воздуха для проведения ионного травления.

Заготовки под корректор затем помещались в установку ионно-пучкового травления. Установка, подробное описание которой представлено в [15], оснащена предметным столиком для крепления образца и широкоапертурным источником ускоренных ионов КЛАН-103М (НТК „Платар“). В качестве рабочего газа использовался аргон. Ионно-оптическая система источника с выходной апертурой, представляющей собой эллипс с полуосями 90 и 60 mm, обеспечивает квазипараллельный (расходимость не более $\pm 3^\circ$) моноэнергетический (разброс по энергиям $\pm 4 \text{ eV}$) ионный пучок.

Размер области на образце, в которой проводилась обработка ионным пучком, ограничивался устанавливаемой перед образцом диафрагмой. Перед диафрагмой на моторизованном линейном трансляторе дополнительно могла размещаться заслонка, перемещение которой в процессе воздействия ионного пучка на образец позволяло получать неоднородный профиль глубины травления вдоль направления движения заслонки.

Для определения скорости травления материалов корректора ФЧ или АЧ, структуры с таким же периодом осаждались на подложки из кремния, и проводилось распыление материала под пучком через диафрагму, вырезающую часть падающего на образец пучка. Глубина съема (высота ступеньки на границе воздействия ионного пучка) в зависимости от времени определялась по измерениям на оптическом профилометре Talysurf CCI 2000.

Измерения коэффициента пропускания заготовок для корректоров проводились на лабораторном стенде [16]. Принцип работы стенда заключается в следующем. Изображение „точечного“ источника ЭУФ излучения (использовалась разборная рентгеновская трубка с кремниевой мишенью, излучение Si L_α -линии, длина волны 13.5 nm) сферическим и плоским многослойными Nb/Si-зеркалами, выполняющими роль двухзеркального монохроматора, передается на исследуемый образец. Прошедшее через пленочный образец излучение регистрируется детектором — кремниевым фотодиодом ФДУК-100УВ. Столик для крепления образцов (карусель) оснащен моторизованным приводом, позволяющим проводить сканирование вдоль поверхности образца с шагом 0.3 mm. Ширина пучка имеет величину около 0.65 mm на полувысоте. Относительная точность измерения коэффициента пропускания составляла 0.1%.

3. Результаты

Первые эксперименты по ионному травлению натянутых по периметру пленок продемонстрировали, что после удаления части материала с поверхности натянутой пленки появляется волнистость пленки (рис. 3). Причины такого поведения могут быть связаны с локальным

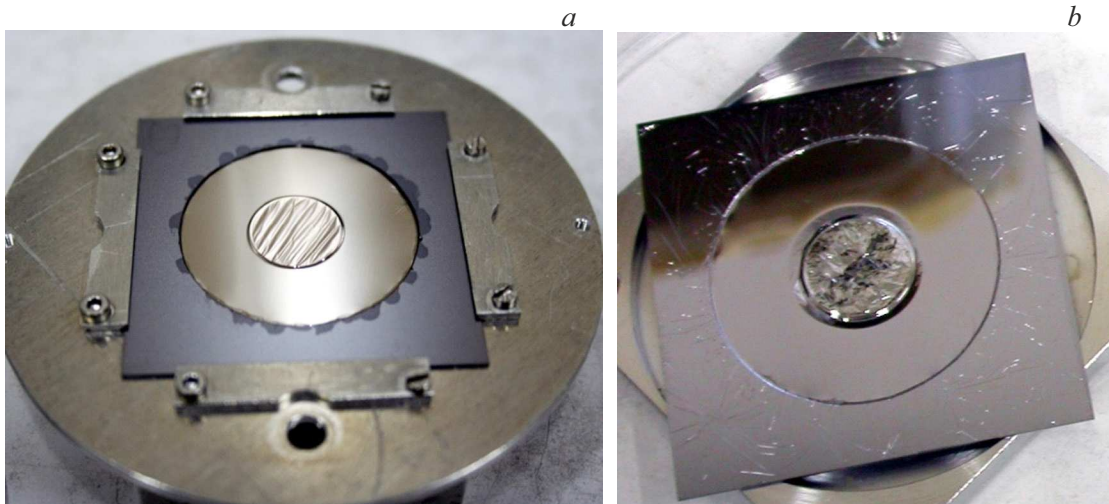


Рис. 3. Фотографии однородно протравленных в центральной области натянутых свободновисящих пленок $\varnothing 30$ mm. *a* — структура $(\text{Zr-3 nm}/\text{ZrSi}_2\text{-1.5 nm}) \times 10 + \text{Si-75 nm}$, травившаяся в течение $t = 12$ min, при ионном токе $I_{ion} = 10$ mA, ускоряющем напряжении $U_{acc} = 500$ V со стороны Zr/ZrSi_2 . Толщина стравившейся части около 20 nm, видна травленная сторона; *b* — образец пленки $(\text{Zr-3 nm}/\text{ZrSi}_2\text{-1.5 nm}) \times 10 + (\text{Si-5 nm}/\text{ZrSi}_2\text{-1.5 nm}) \times 12$, травившейся со стороны Si/ZrSi_2 .

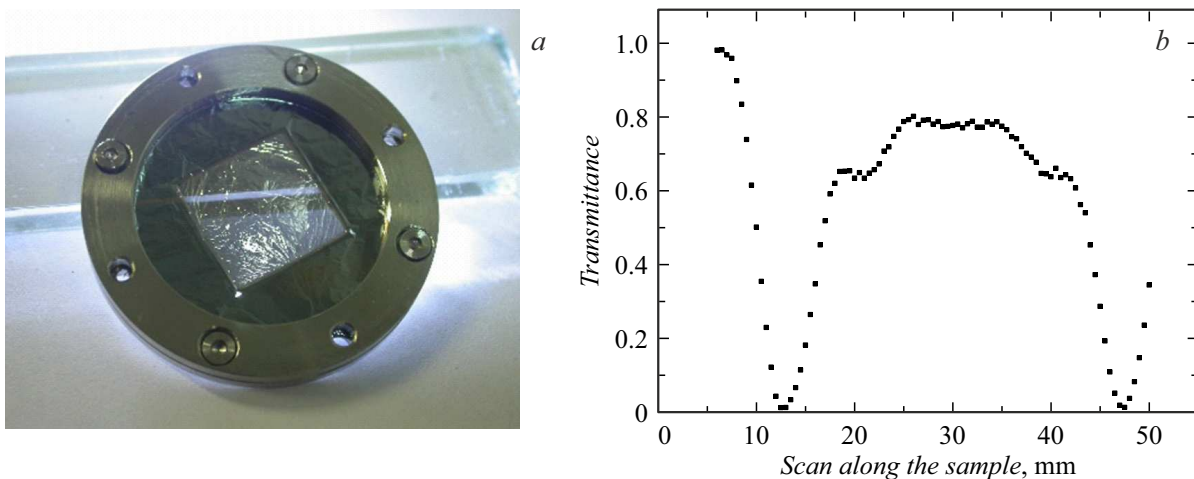


Рис. 4. *a* — фотография образца со структурой $(\text{Zr-3 nm}/\text{ZrSi}_2\text{-1.5 nm}) \times 10 + \text{Si-75 nm}$ после травления ионным пучком в течение $t = 15$ min через квадратное отверстие со стороны кремния; *b* — зависимость коэффициента пропускания образца на длине волны 13.5 nm от координаты.

нагревом и (или) изменением внутренних напряжений в области воздействия. Появление однонаправленных складок возможно связано с исходным неоднородным натяжением пленки. Тем не менее в силу того, что вблизи нормали коэффициент пропускания пленки слабо зависит от угла падения, а набег фаз, в силу малости $(1 - n)$, медленно меняется с увеличением толщины, наличие складок не оказывает существенного влияния на амплитуду и фазу проходящего излучения. Например, в случае мелких складок с характерным размером около $100 \mu\text{m}$ и отклонением от плоскостности на уровне $5 \mu\text{m}$, добавка к величине оптической разности хода в 1 nm составит порядка 0.005 nm, а уменьшение величины коэффициента пропускания — около 0.15% при 60%

коэффициенте пропускания фазового корректора без складок.

На первом этапе был проведен равномерный съем материала ионным пучком (ионный ток $I_{ion} = 10$ mA, ускоряющее напряжение $U_{acc} = 500$ V) в центральной части образцов (через квадратную диафрагму) и проведено изменение коэффициента пропускания образца на лабораторном рефлектометре при нормальном падении на длине волны 13.5 nm (рис. 4). При указанных параметрах ионного пучка за время $t = 15$ min был удален весь слой кремния толщиной около 75 nm. Как видно на графике пропускания, в области воздействия наблюдается полочка, что свидетельствует о хорошей равномерности ионного пучка и равномерности съема.

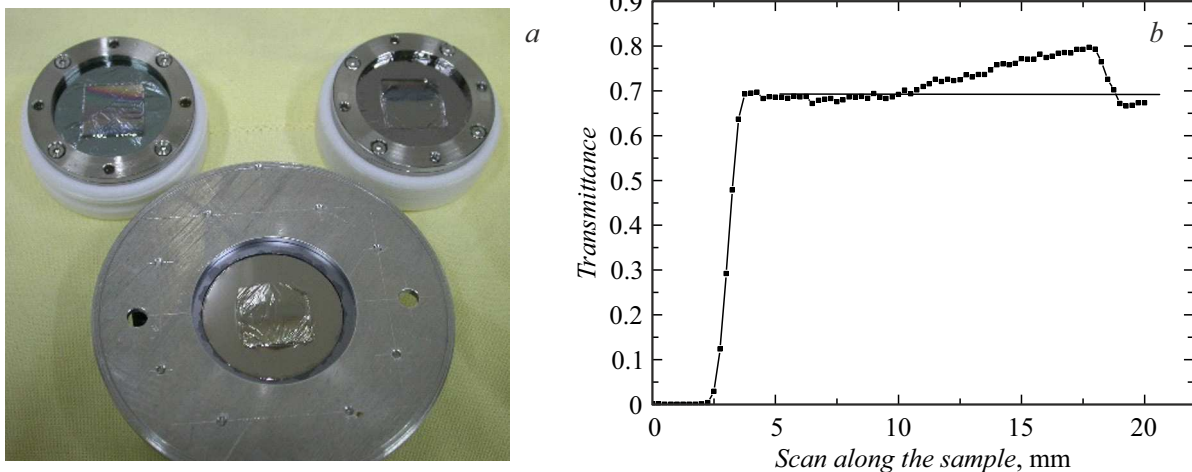


Рис. 5. *a* — фотография заготовок пленочных корректоров $\varnothing 30$ mm с линейным градиентом толщины пленки; *b* — результат измерения коэффициента пропускания на длине волны 13.5 nm структуры $(\text{Nb-3 nm}/\text{ZrSi}_2\text{-1.5 nm}) \times 7 + \text{Si-80 nm}$, протравленного со стороны кремния с линейным градиентом времени ионного травления (параметры процесса: $U_{acc} = 500$ V, $I_{ion} = 10$ mA, $t = 15$ min).

Отметим, что при сканировании образца, установленного на карусели измерительного стенда, пучок последовательно проходит через отверстие вне образца (коэффициент пропускания $T = 1$), рамку образца ($T = 0$), сам образец, снова рамку ($T = 0$) и выходит снова на отверстие вне образца, в результате чего и наблюдается приведенная на рисунке форма сигнала.

На следующем шаге была предпринята попытка создать линейный градиент по толщине образца за счет использования равномерно движущейся заслонки. Заслонка постепенно открывала квадратное отверстие в диафрагме, через которое пучок ионов попадал на образец. На рис. 5 приведены фотографии Zr/ZrSi_2 - и Nb/ZrSi_2 -структур с Si „амплитудной“ частью, в центре которых был создан линейный градиент по толщине кремния, а также результат измерения коэффициента пропускания по апертуре одного из образцов на длине волны 13.5 nm.

График зависимости интенсивности, зарегистрированной детектором, от координаты вдоль апертуры образца состоит из нескольких характерных областей. Вначале наблюдается нулевая интенсивность прошедшего сигнала, когда пучок попадает в поддерживающую рамку, далее виден резкий нарастающий фронт (профиль которого определяется конечной шириной зондирующего пучка), горизонтальное плато, соответствующее нетравленной части пленки, и затем область роста коэффициента пропускания, что соответствует области, подвергшейся ионному травлению. Нерезкий спад, что наблюдается на границе с наибольшим съемом, связан с тем, что диафрагма, формирующая пучок на образце, находится на конечном расстоянии от образца (в нескольких миллиметрах), что приводит к тому, что участок пленки вблизи границы с теневой стороны подвергается воздействию ионов.

Как можно видеть на графике (рис. 5), удалось сформировать вдоль апертуры пленки близкий к линейному градиенту изменения интенсивности излучения, проходящего через пленку.

Заключение

В оптических схемах дифракционного качества МР и ЭУФ диапазона для исправления ошибок волнового фронта, вызванного неточностями в позиционировании и форме поверхности рентгеновских зеркал, могут применяться фазовые корректоры. Один из возможных вариантов — пленочный корректор на просвет, устанавливаемый дополнительно в оптическую схему.

В работе приведены основные принципы выбора материалов для пленочного корректора, обеспечивающего наибольший коэффициент пропускания при требуемой величине фазового сдвига.

Изготовлены заготовки (пленки однородной толщины) для пленочных корректоров с апертурой до 80 mm и имеющих коэффициент пропускания на рабочей длине волны 13.5 nm не менее 60%. Заготовки состоят из двух частей: „фазовой“, имеющей отличный от 1 показатель преломления и служащей для фазовой коррекции проходящего сквозь нее излучения, и „амплитудной“, имеющей показатель преломления близкий к 1 и призванной компенсировать изменения в распределении интенсивности после прохождения излучения через „фазовую“ часть. С целью повышения прочности, фазовая и (или) амплитудная части корректоров изготавливались в виде многослойных пленок.

Заготовки использовались для экспериментов по созданию распределений по толщине пленок путем удаления части пленки под воздействием ионных пучков. Про-

демонстрирована возможность использования ионно-пучкового травления для равномерного съема части пленки или создания линейного градиента по толщине, что указывает на перспективность такого подхода.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования, соглашение № 075-15-2021-1350 от 5 октября 2021 г. (внутренний номер 15.СиН.21.0004).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] М. Борн, Э. Вольф. *Основы оптики* (Наука, М., 1973)
- [2] V. Bakshi. *EUV Lithography* (SPIE, John Wiley & Sons, Inc., 2008)
- [3] R. Saathof, G.J.M. Schutten, J.W. Spronck, R.H.M. Schmidt. *Precision Engineer*, **41**, 102 (2015). DOI: 10.1016/j.precisioneng.2015.03.004
- [4] M. Singh, M.F. Bal, J.J.M. Braat, D. Joyeux, U. Dinger. *Appl. Opt.*, **42** (10), 1847 (2003). DOI:10.1364/ao.42.001847
- [5] M. Yamamoto. *Nucl. Instrum. Methods A*, **467–468** (2), 1282 (2001). DOI: 10.1016/S0168-9002(01)00640-4
- [6] B. Bittner, N. Wabra, S. Schneider et al. Patent DE102012202057B4. 10.02.2012.
- [7] N.I. Chkhalo, M.N. Drozdov, S.A. Gusev, E.B. Kluev, A.Ya. Lopatin, V.I. Luchin, N.N. Salashchenko, L.A. Shmaenok, N.N. Tsybin, B.A. Volodin. *Proc. SPIE*, **8076**, 807600-1 (2011). DOI: 10.1117/12.886781
- [8] N.I. Chkhalo, M.N. Drozdov, E.B. Kluev, A.Ya. Lopatin, V.I. Luchin, N.N. Salashchenko, N.N. Tsybin, L.A. Shmaenok, V.E. Banine, A.M. Yakunin. *J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS*, **11** (2), 021115 (2012). DOI: 10.1117/1.JMM.11.2.021115
- [9] С.Ю. Зуев, А.Я. Лопатин, В.И. Лучин, Н.Н. Салашченко, Н.Н. Цыбин, Н.И. Чхало. *Микроэлектроника*, **52** (5), 354 (2023). DOI: 10.31857/S0544126923700539
- [10] A.D. Akhsakhalyan, E.B. Kluev, A.Ya. Lopatin, V.I. Luchin, A.N. Nechay, A.E. Pestov, V.N. Polkovnikov, N.N. Salashchenko, M.V. Svechnikov, M.N. Toropov, N.N. Tsybin, N.I. Chkhalo, A.V. Shcherbakov. *J. Surf. Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, **11** (1), 1 (2017). DOI:10.1134/S1027451017010049
- [11] Н.Н. Салашченко, Н.И. Чхало, Н.А. Дюжев. *Поверхность. Рентген. синхротр. и нейтрон. исслед.*, **10**, 10 (2018). DOI: 10.1134/S0207352818100165
- [12] N.I. Chkhalo, N.N. Salashchenko. *AIP Advances*, **3**, 082130 (2013). DOI: 10.1063/1.4820354
- [13] Электронный ресурс. Режим доступа: <https://cxro.lbl.gov/>
- [14] M.S. Bibishkin, N.I. Chkhalo, S.A. Gusev, E.B. Kluev, A.Y. Lopatin, V.I. Luchin, A.E. Pestov, N.N. Salashchenko, L.A. Shmaenok, N.N. Tsybin, S.Y. Zuev. *Proc. SPIE*, **7025**, 702502 (2008). DOI:10.1117/12.802347
- [15] N.I. Chkhalo, E.B. Kluev, A.E. Pestov, V.N. Polkovnikov, D.G. Raskin, N.N. Salashchenko, L.A. Suslov, M.N. Toropov. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, **603** (1–2), 62 (2009). DOI: 10.1016/j.nima.2008.12.160
- [16] М.С. Бибишкин, И.Г. Забродин, И.А. Каськов, Е.Б. Клуев, А.Е. Пестов, Н.Н. Салашченко, Д.П. Чехонадских, Н.И. Чхало, Л.А. Шмаенок. *Известия АН. Сер. физ.*, **68** (4), 560 (2004).