

УДК 681.7:621.793:535.3

СОСТОЯНИЕ ДЕЛ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МНОГОСЛОЙНОЙ РЕНТГЕНОВСКОЙ ОПТИКИ В ИФМ РАН

© 2017 г. А. Д. Ахсахалян¹, Е. Б. Клюенков¹, А. Я. Лопатин¹, В. И. Лучин¹, А. Н. Нечай¹,
А. Е. Пестов¹, В. Н. Полковников^{1,2}, Н. Н. Салащенко¹, М. В. Свечников¹, М. Н. Торопов¹,
Н. Н. Цыбин¹, Н. И. Чхало^{1, *}, А. В. Щербаков¹

¹Институт физики микроструктур РАН, 603950 Нижний Новгород, Россия

²Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 603950 Нижний Новгород, Россия

*E-mail: chkhalo@ipmras.ru

Поступила в редакцию 28.04.2016 г.

Благодаря современным успехам в области напыления многослойных зеркал и технологии изготовления сверхгладких и сверхточных подложек для зеркал появилась реальная возможность использовать традиционные оптические методы в диапазонах мягкого рентгеновского и экстремального ультрафиолетового излучения. Реализация этой возможности откроет принципиально новые перспективы в нанодиагностике вещества, в микро- и нанoeлектронике, микробиологии, астрономии и в других приложениях. Представлены основные направления в области многослойной рентгеновской оптики, развиваемые в ИФМ РАН, и рассмотрены аспекты ее применения в науке и технике. Обсуждаются основные проблемы, возникающие при изготовлении многослойных интерференционных структур для диапазонов мягкого рентгена и экстремального ультрафиолета. Приводятся основные результаты, полученные в последнее время в рамках каждого направления. Обсуждаются планы развития направлений на ближайшее будущее.

Ключевые слова: рентгеновская оптика, диапазоны мягкого рентгеновского и экстремального ультрафиолетового излучения, многослойные интерференционные структуры, свободновисящие пленки, кластерные пучки.

DOI: 10.7868/S0207352817010048

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в связи с прогрессом в технологии напыления многослойных интерференционных структур для экстремального ультрафиолетового (ЭУФ) и мягкого рентгеновского (МР) излучения (длины волн 0.6–60 нм) появилась реальная возможность использовать традиционные оптические методы в ЭУФ- и МР-диапазонах [1, 2]. Например, мягкая рентгеновская микроскопия, сравнимая по пространственному разрешению с электронной микроскопией, благодаря особенностям взаимодействия ЭУФ- и МР-излучения с веществом, обладает рядом существенных преимуществ. Сильный абсорбционный контраст, предельно малое рассеяние (сечение рассеяния на пять порядков меньше, чем фотопоглощения), умеренное поглощение в исследуемых образцах (длина поглощения до 10 мкм) и в воздухе (более 1 мм при нормальном давлении) [3], малая глубина фокуса (до 30–40 нм при числовой апертуре объектива $NA = 0.3$ (NA – numerical aperture)) обеспечивают уникальные возможности для микробиологических исследований.

Можно изучать достаточно толстые образцы (для сравнения в электронной микроскопии из-за сильно рассеяния изучаются слайсы толщиной 0.1–0.3 мкм), не требуется применение контрастных веществ и заморозка образцов. Можно изучать даже живые образцы, помещенные в специальные вакуумно-плотные кюветы при атмосферном давлении. Процесс 3D-томографии сводится к получению серии изображений образца при его перемещении вдоль оптической оси микроскопа.

Использование различных физических эффектов, например, магнитного дихроизма, позволяет проводить исследования магнитных свойств материалов с нанометровым пространственным разрешением, причем не только на поверхности, но и внутри образца [4].

Несмотря на впечатляющие возможности мягкой рентгеновской микроскопии как метода нанодиагностики, она не получила широкого распространения в лабораториях, главным образом, из-за ограниченных возможностей зонных пластинок Френеля, используемых в качестве изображающих оптических элементов [5, 6]. Эти огра-

ничения касаются низкой геометрической и числовой апертуры ($NA < 0.1$), узкого рабочего спектрального диапазона ($\lambda < 3-4$ нм при условии высокого разрешения), низкой дифракционной эффективности (на уровне 10%) и значительных хроматических аберраций (требуется монохроматизация пробного пучка на уровне $\lambda/\delta\lambda > 500$).

Числовая апертура может быть увеличена в несколько раз, рабочий диапазон расширен до ЭУФ-области, а величина сигнала повышена на несколько порядков при использовании многослойных зеркал нормального падения для построения изображений [7]. С точки зрения оптики ключевые проблемы, которые должны быть решены для внедрения этого метода в лабораторную практику, следующие: создание подложек для многослойных зеркал, обеспечивающих дифракционное качество изображений в МР- и ЭУФ-диапазонах; существенное повышение коэффициентов отражения многослойных интерференционных структур, особенно в “углеродном” и “водном” окнах прозрачности.

При сохранении в будущем современной парадигмы, что ключевой технологией микроэлектроники, определяющей топологические размеры микросхем, является фотолитография, дальнейший прогресс в микроэлектронной промышленности связывают с литографией на длине волны в области 13.5 нм и даже ниже. В частности, уже сейчас в компаниях Intel, Samsung и в научном центре ИМЕС в ряде работ для формирования критических слоев используют ЭУФ-литографию на длине волны 13.5 нм. Экспериментально показано, что благодаря короткой длине волны отпадает необходимость привлечения дополнительных методов повышения разрешающей способности, в разы уменьшается число масок и технологических операций, что приводит к двух-трехкратному уменьшению стоимости литографического процесса по сравнению с традиционной литографией на длине волны 193 нм [8, 9].

Опыт развития ЭУФ-литографии показал, что период от первых научно-исследовательских работ до создания предпроектного сканера составил около двадцати лет, поэтому уже сейчас нужно думать о применении более короткой длины волны.

К ключевым проблемам оптики для ЭУФ- и перспективной МР-литографии относятся: повышение коэффициентов отражения многослойных зеркал; выбор наиболее перспективной длины волны в МР-диапазоне с точки зрения максимальных коэффициентов отражения многослойных интерференционных структур для литографии следующего поколения; совершенствование технологии финишной полировки и формообразования подложек; разработка абсорбционных фильтров спектральной очистки излучения (SPF –

spectral purity filters) и защиты масок от загрязнений (pellicle) с техническими характеристиками, удовлетворяющими производителей литографического оборудования. В силу массового характера производства этих элементов (расходный материал) дополнительным требованием является “технологичность” их изготовления и минимизация стоимости.

В последнее время в связи с усложнением глобальной техно(инфо)сферы планеты Земля резко возросло влияние ближнего космоса и, прежде всего, Солнца на жизнь человека. Изучение физики Солнца теперь уже представляет не только научный интерес, но и огромное практическое значение. С конца прошлого столетия в обиход даже вошел термин “космическая погода”. Основным источником информации о процессах, происходящих на Солнце, является его корона, максимум излучения которой лежит в ЭУФ-диапазоне. Для решения научных задач, поставленных астрофизиками, требуется увеличение углового разрешения ЭУФ-телескопов от $\sim 1''$ до $\sim 0.1''$, уменьшение спектральной полосы отражения зеркал в полтора–два раза при сохранении коэффициентов отражения, как минимум, на существующем уровне. Планируются так же миссии к Солнцу на расстояние порядка 0.2 а. е.

Решение этих задач требует совершенствования технологии изготовления подложек и фильтров. При изготовлении подложек к традиционным проблемам добавляются новые, связанные с учетом гравитационных искажений их формы, минимизацией их массы и другие проблемы. Для уменьшения искажений изображений, вызванных дифракцией ЭУФ-излучения на сетке, на которой закреплен фильтр, требуется увеличение почти на порядок (в 100 раз по площади) размера ячейки. Это предъявляет дополнительные требования к механической прочности тонкопленочных фильтров. Особенностью проекта, когда телескоп располагается близко от Солнца, является большая, до 2 Вт/см^2 , радиационная нагрузка на первый оптический элемент.

Помимо отмеченных выше задач многослойные интерференционные структуры и оптические системы на их основе находят широкое применение в других научных исследованиях. В частности, свободновисящие структуры нашли широкое применение в качестве поляризаторов и фазосдвигающих пластин, вплоть до четверть-волновых. Эти элементы востребованы как в центрах синхротронного излучения, так и в лабораториях. Они позволяют проводить на лабораторных источниках излучения исследования, которые ранее были возможны только в синхротронных центрах [10].

В последнее время появилась потребность в развитии систем космического мониторинга

верхних слоев атмосферы и околоземного пространства в вакуумном ультрафиолетовом (ВУФ) и ультрафиолетовом (УФ) диапазонах [11]. Благодаря тому, что в этом диапазоне Земля и атмосфера являются “черными” даже в дневное время суток, этот метод является наиболее эффективным для обнаружения движущихся в ближнем космосе гиперзвуковых аппаратов.

В связи с появлением в мире, в том числе и в ФИЦ “Институт прикладной физики РАН”, сверхмощных фемтосекундных лазеров возник большой интерес к аperiodическим многослойным интерференционным структурам, позволяющим транспортировать, фокусировать, проводить спектральный анализ атто- и даже субаттосекундных импульсов электромагнитного излучения. Широкая полоса пропускания позволяет управлять этими пучками без “размытия” волнового пакета во времени. Короткая длина волны и длительность импульса позволяют на три–пять порядков увеличить плотность мощности излучения в пятне фокусировки и вплотную приблизиться к достижению рекордных значений 10^{28} – 10^{30} Вт/см².

Большое практическое значение имеют одиночные эллиптические и параболические зеркала и системы на их основе для коллимации и фокусировки жесткого рентгеновского излучения. Они применяются как на синхротронных, так и на лабораторных источниках излучения, в том числе и в серийных рентгеновских приборах. Интенсивность зондового пучка повышается на один–два порядка [12]. Основным достоинством данного типа оптического элемента перед капиллярными линзами является монохроматизация отраженного рентгеновского пучка, а перед рефрактивными – практически не ограниченный рабочий диапазон и отсутствие хроматических aberrаций.

В настоящей работе описываются развиваемые в ИФМ РАН основные научно-технологические направления для решения указанных выше проблем, приводятся основные результаты, полученные в последнее время. Значительное внимание будет уделено работам по развитию оптики дифракционного качества для МР- и ЭУФ-диапазонов. Исследования включают метрологические измерения формы и шероховатости, ионно-пучковые технологии полировки и коррекции формы подложек, крепление подложек в оправы и другие аспекты. По каждому направлению приводятся ключевые задачи, которые будут решаться в ближайшие годы.

2. ФИЗИКА, ТЕХНОЛОГИЯ И ДИАГНОСТИКА МНОГОСЛОЙНЫХ СТРУКТУР

Базовым направлением исследований в области рентгеновской оптики в ИФМ РАН является физика и технология изготовления многослойных структур. Основным методом изготовления является магнетронное распыление. Комплекс оборудования для напыления многослойных интерференционных структур насчитывает восемь технологических установок: две с двумя магнетронами, четыре с четырьмя и две с шестью. Необходимость использования большого числа магнетронов (с мишенями из различных материалов) в одной установке продиктована необходимостью напыления антидиффузионных барьеров между материалами (как на одной границе [13, 14], так и на обеих [15]), “жертвенных слоев” в случае реставрации подложки или последующего съема структуры с подложки, или использования ее в качестве свободностоящего рентгенооптического элемента, либо для компенсации напряжения в пленках [16–18], а также “крышек”, предотвращающих окисление слоев в структуре [19].

В ряде задач, например при напылении шаблонов (mask-blank) для ЭУФ-литографии, когда не допускаются дефекты размером более 20–30 нм, для напыления многослойных структур используют ионные пучки [20]. Одна из четырех магнетронных установок имеет две ионные пушки, позволяющие изготавливать многослойные интерференционные структуры методом ионно-пучкового распыления [21]. Более того, эта установка включает два ионных источника для ионной полировки растущих пленок.

Благодаря уникальным оптическим константам бериллия, в частности в ЭУФ-диапазоне, его можно использовать и в качестве слабопоглощающего, и одновременно в качестве рассеивающего материала [22, 23]. Применяют многослойные структуры Ве/Х, где Х – парный материал к Ве. Для синтеза таких многослойных структур в 2014 г. была создана бериллиевая лаборатория. В настоящее время в ней находятся установки напыления с четырьмя и шестью магнетронами. Фотография лаборатории с установками приведена на рис. 1. Так как в мире отсутствует подобная лаборатория, то есть надежда в ближайшее время на получение приоритетных научных и технологических результатов.

Многослойные интерференционные структуры для МР- и ЭУФ-диапазонов обладают определенной спецификой. Во-первых, в соответствии с законом Брэгга для многослойных зеркал нормального падения периоды интерференционной структуры должны составлять половину длины волны, соответственно, пленки – четверть длины волны. Технологически на сегодняшний момент



Рис. 1. Фотография “бериллиевой” лаборатории с установками магнетронного распыления.

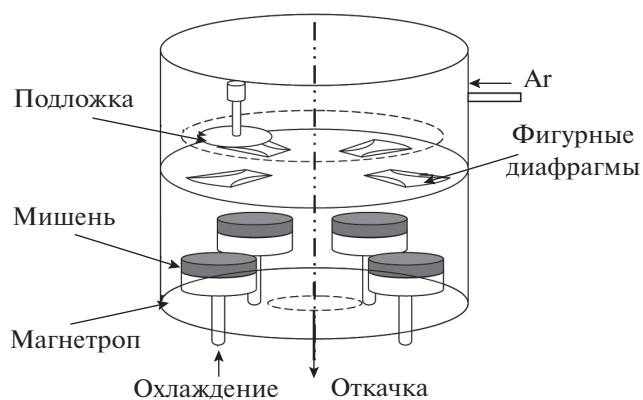


Рис. 2. Схема напыления многослойной интерференционной структуры в установке магнетронного распыления.

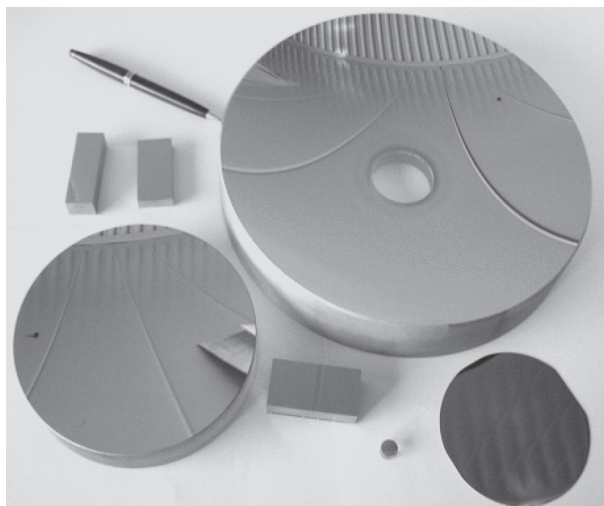


Рис. 3. Фотография типичных многослойных зеркал, изготавливаемых в ИФМ РАН.

доказана возможность изготовления сплошных пленок в многослойной структуре с периодом от 1 нм [24]. С учетом малости скачка показателя преломления на границах для обеспечения высоких коэффициентов отражения требуется число периодов от нескольких десятков в ЭУФ- до 500–1000 в МР-диапазонах. Для обеспечения конструктивной интерференции волн, отраженных от различных границ многослойной структуры, средняя флуктуация периода $\delta d/d$ не должна превышать 0.1–0.2%.

Вторая особенность – это равномерность толщины напыляемых пленок по поверхности подложки, которая должна соответствовать такой же точности $\delta d/d \approx 0.1–0.2\%$. В случае изображающей (криволинейной) оптики условие Брэгга должно выполняться в каждой точке подложки, а значит напыляется структура с градиентом периода по поверхности $d(\mathbf{r})$. В абсолютных величинах это составляет десятые доли ангстрема. Эти точности совершенно не характерны для традиционных оптических приложений и часто вызывают удивление и недоверие. Однако, если эти цифры не обеспечить, то коэффициенты отражения упадут на несколько порядков.

Требуемые точности распределения периода по поверхности достигаются за счет фигурных диафрагм, установленных между напыляемой подложкой и магнетронным источником, и комбинированного вращения детали вокруг оси установки и собственной оси. Схема напыления многослойной интерференционной структуры приведена на рис. 2. Толщину напыляемых пленок контролируют по параметрам магнетронного разряда: давлению рабочего газа, напряжению и току разряда. Разброс толщин слоев составляет около 0.1%.

В настоящее время изготавливают большое количество многослойных интерференционных структур из различных пар материалов (более 20). Размер зеркал может изменяться от 4 до 250 мм. На рис. 3 приведена фотография типичных многослойных зеркал, напыляемых в ИФМ РАН.

На рис. 4 представлены спектральные зависимости коэффициентов отражения многослойных интерференционных структур в диапазоне длин волн 2.3–35 нм. Линиями с символами представлены теоретические зависимости, звездочками – полученные в ИФМ РАН коэффициенты отражения при нормальном падении. Следует отметить, что этот график хорошо отражает мировой уровень. Из этого рисунка можно сделать два основных вывода. Во-первых, полученные коэффициенты отражения составляют около 16% в области длин волн 3–6 нм и 60–70% в области 6.6–20 нм. Это говорит о том, что уже сейчас с помощью многослойных зеркал можно создавать самые сложные оптические схемы и теоретически до-

стичь дифракционного предела пространственного разрешения на уровне длины волны. Во-вторых, видно, что в большинстве случаев экспериментальные коэффициенты отражения ниже теоретического предела, а значит, требуется совершенствование технологии роста. Для достижения этих целей в ближайшем будущем будут решаться следующие задачи.

2.1. Модернизация технологического оборудования с целью улучшения рабочего вакуума более чем на порядок (до 10^{-8} торр). В настоящее время откачка ведется безмасляными спиральными форвакуумными (производительность 8 л/с) и турбомолекулярными (производительность 1500 л/с) насосами. Спектры остаточных и рабочего (преимущественно аргон) газов показывают, что основной примесью являются пары воды и в меньшей степени — углеводороды. Для решения этой проблемы установки будут оснащены азотными криопанелями, устройствами сушки аргона и шлюзами для закладки подложек и выгрузки зеркал.

2.2. Совершенствование технологии магнетронного распыления. В настоящее время для улучшения отражательных характеристик многослойных интерференционных структур усилия исследователей-технологов сконцентрированы, главным образом, на оптимизации состава и толщины барьерных слоев, предотвращающих перемешивание материалов [13–15], на поиске реактивных газов, снижающих химическое взаимодействие материалов пленок на границах [25], либо новых, перспективных пар материалов [22, 26, 27]. В дополнение к этим направлениям в проекте исследования, направленные на развитие собственно технологии напыления многослойных структур. В рамках этих исследований в ИФМ РАН планируется ряд мероприятий.

Первое — представляется перспективным применение импульсного сильноточного магнетронного разряда (ток разряда более чем на два порядка превышает традиционный разряд). В ряде исследований, например [28], показано, что благодаря большой мгновенной скорости напыления эти пленки обладают большей плотностью, чем пленки, полученные традиционным магнетронным распылением. Это должно привести к увеличению оптического контраста на границах и, как следствие, к увеличению коэффициентов отражения многослойных структур. Этот метод еще никто не применял при изготовлении многослойных интерференционных структур для МР- и ЭУФ-диапазонов.

Второе — это разработка новых конструкций магнетронов с уменьшенным рабочим напряжением и уширенной зоной эрозии мишени. Известно, что уменьшение напряжения на магнетронном разряде снижает среднюю энергию ато-

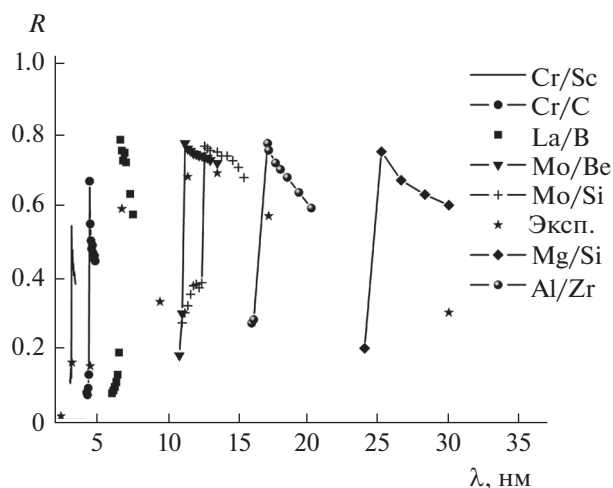


Рис. 4. Спектральные зависимости коэффициентов отражения многослойных зеркал. Линиями с символами представлены теоретические зависимости, звездочками — полученные в ИФМ РАН коэффициенты отражения при нормальном падении.

мов конденсата. Это, в свою очередь, уменьшает глубину перемешивания материалов пленок на границах [29, 30]. Уширение зоны эрозии из-за практически неизменной геометрии между подложкой и мишенью, с одной стороны, улучшает периодичность и воспроизводимость характеристик многослойных структур от напыления к напылению, а с другой — приводит к значительной экономии средств, так как зачастую используются дорогостоящие пленкообразующие материалы.

Третье — при магнетронном распылении в установке [21] будет применяться полировка растущих пленок методом ионно-пучкового травления. Идея подхода заключается в том, что после напыления верхний рыхлый слой будет убираться, и, соответственно, последующий слой будет взаимодействовать с плотной и гладкой пленкой. Результатом этого станет перемешивание в меньшей степени материалов пленок на межслоевых границах.

2.3. Совершенствование алгоритма восстановления структуры и методов аттестации многослойных интерференционных структур. Совершенствование технологий невозможно без адекватных методов изучения характеристик пленок и границ в многослойных структурах и полной паспортизации рентгенооптических свойств элементов. Основным методом изучения внутреннего строения многослойных интерференционных структур является рефлектометрия в диапазонах мягкого и жесткого рентгена. В ИФМ РАН имеются два постоянно действующих рефлектометра собственной разработки [31, 32]. Для монохроматизации излучения в рефлектометрах используют решеточные спектрометры-монохроматоры скользя-

шего падения РСМ-500 и Jobin Yvon. Спектрометры перекрывают диапазон длин волн от 0.6 до 200 нм. Рефлектометры оснащены гониометрами, обеспечивающими пять степеней свободы для образца и две для детектора. Это позволяет изучать образцы со сложной формой поверхности, диаметром до 300 мм, толщиной до 50 мм и массой до 10 кг.

В диапазоне длин волн 0.6–25 нм в качестве источников излучения используют разборные рентгеновские трубки оригинальной конструкции [33]. Главной особенностью этих трубок является использование торированного вольфрама в качестве материала термокатода и наличие встроенного ионного источника для чистки мишеней от загрязнения продуктами декомпозиции углеводородов и испарения термокатода. В результате время жизни термокатода выросло почти на два порядка. В диапазоне длин волн 30–200 нм в качестве источника используют магнетронный разряд в разряженном газе.

Рефлектометры обладают высоким спектральным разрешением, однако из-за низкой интенсивности источников излучения работа проводится только на спектральных линиях, что резко снижает исследовательские возможности. Для решения этой проблемы в ИФМ РАН в завершающей стадии разработки находится рефлектометр с лазерно-плазменным источником МР- и ЭУФ-излучения со спектрометром-монохроматором на основе схемы Черни–Тюрнера с плоской дифракционной решеткой [34, 35]. Рефлектометр позволит изучать зеркала диаметром до 500 мм с непрерывной перестройкой спектра.

Благодаря непрерывному спектру, высокой интенсивности монохроматического пробного пучка наряду с рефлектометрией многослойных зеркал будут изучаться дифракционные решетки с многослойными покрытиями [36, 37] и развиваться исследования в области EXAFS- (Extended X-ray Absorption Fine Structure – тонкая структура спектра поглощения) и NEXAFS-спектроскопии (Near Edge Absorption Fine Structure – тонкая структура спектра вблизи края поглощения) в МР- и ЭУФ-диапазоне. Появятся уникальные возможности изучать тонкую структуру пленок и границ раздела в многослойных структурах [38, 39].

В дополнение к основному методу изучения структурных параметров многослойных зеркал (периода и индивидуальных толщин пленок, плотности материалов, ширины переходных областей и межслоевой шероховатости) – рефлектометрии в диапазоне жесткого рентгена – привлекают результаты измерений коэффициентов отражения в МР- и/или ЭУФ-диапазоне [40]. В ИФМ РАН имеются три серийных дифрактометра, работающих на длине волны 0.154 нм, два из которых (Philips X’Pert Pro MRD и Panalytical

X’Pert Pro) оснащены гониометрами с шестью степенями свободы. Метод основан на минимизации функционала рассогласования экспериментальной и расчетной кривых. Так как подгонка ведется по десяткам и даже по сотням параметров, то зачастую можно достичь прекрасного совпадения эксперимента и теории, однако результат может быть абсолютно “нефизичным”. Поэтому на практике прибегают к разработке априорных моделей многослойных интерференционных структур. Далее подгонка кривых отражения ведется уже в рамках этой модели структуры. Так как чувствительность кривых отражения в диапазоне жесткого рентгена к плотности материалов невысокая, в отличие от МР- и ЭУФ-диапазонов, то для согласования эксперимента и теории на окончательной стадии подгонки вносятся поправки в оптические константы материалов в МР- и ЭУФ-диапазонах. Недостатки такого подхода очевидны.

Для решения этой проблемы в ИФМ РАН развивают так называемый “безмодельный подход”, предложенный в [41] для изучения отдельных пленок и пленочных систем с небольшим числом слоев и который распространяют на многослойные системы. Этим методом можно получить распределение диэлектрической проницаемости в элементарной ячейке (в периоде) и в верхнем слое многослойной интерференционной структуры, минимизируя функцию невязки по малому числу параметров. Далее полную кривую отражения многослойной структуры с использованием этих данных подгоняют варьированием только индивидуальных толщин пленок.

Новизной подхода к исследованию многослойной интерференционной структуры является также применение атомно-силовой микроскопии (АСМ). Изучение шероховатости пленок на разных стадиях их роста позволит с большей достоверностью разделить вклады “ростовой” шероховатости и смешивания материалов в ширины переходных областей и установить корреляции шероховатостей границ вдоль и поперек вектора обратной решетки многослойной структуры.

Дополнительным методом исследования многослойных интерференционных структур является вторичная ионная масс-спектроскопия, позволяющая изучать химический состав образцов с разрешением по глубине. Несмотря на умеренное, на уровне 1 нм, разрешение по глубине метод оказался весьма эффективным при анализе поверхностных слоев, эффектов применения антидиффузионных барьеров, идентификации примесей и динамики структуры пленок в процессе термического отжига [42–44]. Возможности этого метода для изучения многослойных структур в МР- и ЭУФ-диапазонах еще только начинают ис-

пользовать, а потенциал метода не исчерпывается отмеченными выше применениями.

Также дополнительную информацию, прежде всего о микроструктуре пленок и переходных слоев в многослойных интерференционных структурах можно получить с использованием высокоразрешающей электронной микроскопии срезов [45, 46].

2.4. Бериллийсодержащие многослойные интерференционные структуры. Благодаря особенностям оптических констант бериллия многослойные интерференционные структуры *Me/Be* (*Me* – парный бериллию металл) обладают уникальными характеристиками в МР- и ЭУФ-диапазонах [47, 48]. В частности, в [49] теоретически показано, что многослойные структуры *Ru/Be* в составе проекционной схемы литографа с рабочей длиной волны в области 11 нм обеспечивают в полтора раза больший интегральный коэффициент отражения по сравнению со структурой *Mo/Si* на 13.5 нм. С учетом меньшей на 20% длины волны (соответственно, большее пространственное разрешение) “чистого” Хе источника излучения вместо Sn эта спектральная область и, соответственно, многослойная оптика на основе *Me/Be* представляют значительный интерес для литографии следующего поколения.

Для планируемых в настоящее время миссий для изучения Солнца необходимы ЭУФ-телескопы с увеличенным пространственным, спектральным и временным разрешением. С точки зрения многослойных зеркал увеличение временного (коэффициенты отражения должны быть максимально высокими) и спектрального (полоса отражения должна быть узкой) разрешения – это взаимоисключающие требования. Способом разрешения этого противоречия является поиск новых материалов для многослойных интерференционных структур. Теоретические расчеты и первые эксперименты показали, что в области длин волн 11–17 нм наилучший кандидат – это *Mo/Be* (вместо *Mo/Si* в области 12.4–17 нм) [23], а в области 17–30 нм (может, рабочий диапазон простирается и дальше в длинноволновую область, но пока это неизвестно) – *Al/Be* [22]. Одновременное сочетание высокого коэффициента отражения и узкой спектральной полосы пропускания достигается за счет того, что в структуре *Al/Be* бериллий выступает в качестве сильно рассеивающего (а не “спейсера”, как обычно) и слабопоглощающего (близкого к *Al*) материала.

На данный момент можно считать, что структуры *Me/Be* практически не изучены. Так как в мире лаборатории, подобные лаборатории ИФМ РАН отсутствуют, в ближайшие годы ожидается получение приоритетных результатов как в физике и технологии изготовления многослойных структур, так и в их применении в научных и технологических исследованиях.

2.5. Аперриодические многослойные интерференционные структуры. Технологией изготовления аперриодических многослойных интерференционных структур занимаются уже давно. Решен ряд очень интересных задач, прежде всего, управления субфемтосекундными импульсами электромагнитного излучения [50, 51]. Однако из-за довольно узкого спектра применения такой оптики в рентгеновском диапазоне эти исследования нельзя было назвать систематическими. В последнее время в связи активными исследованиями в области аттофизики эта тема становится крайне актуальной. Спектр задач, которые будут решаться, в том числе и с помощью аперриодических зеркал, становится довольно широким. Это транспортировка, построение изображений, спектральная обработка, фокусировка и управление длительностью (укорочение) аттосекундных импульсов электромагнитного излучения. Для успешного решения этих задач планируется проведение следующих базовых исследований. Первое – довести уровень технологии изготовления, метрологии и решения обратной задачи до уровня, характерного для периодических многослойных структур. Второе – разработать теоретические модели и экспериментальные методики для управления длительностью отраженных импульсов. Третье – разработать и создать фокусирующую систему с аперриодическими зеркалами для получения сверхсильных электромагнитных полей за счет “нанометровой” фокусировки аттосекундных импульсов.

3. СВОБОДНОВИСЯЩАЯ МНОГОСЛОЙНАЯ ОПТИКА

Отделенные от подложки так называемые свободновисящие многослойные интерференционные структуры находят широкое применение в научных исследованиях и технологиях. Основные их области применения: светоделительные пластинки, поляризаторы и фазовращатели для МР- и ЭУФ-излучения, отрезающие длинноволновое излучение фильтры, пленочная защита масок от загрязнений твердотельными фракциями и выходного зеркала проекционного объектива ЭУФ-литографа от продуктов разложения фотоэмульсии [52–54]. Помимо проекционной литографии фильтры спектральной очистки широко используются в плазменных экспериментах, в астрономии МР- и ЭУФ-диапазонов и в других приложениях. Состав фильтров, их толщина, наличие или отсутствие поддерживающих сеток строго зависят от приложения и условий эксплуатации. Экстремальные условия эксплуатации и повышенные технические требования к фильтрам характерны для литографических применений. В частности, одновременно требуются максимальное пропускание на рабочей длине волны,

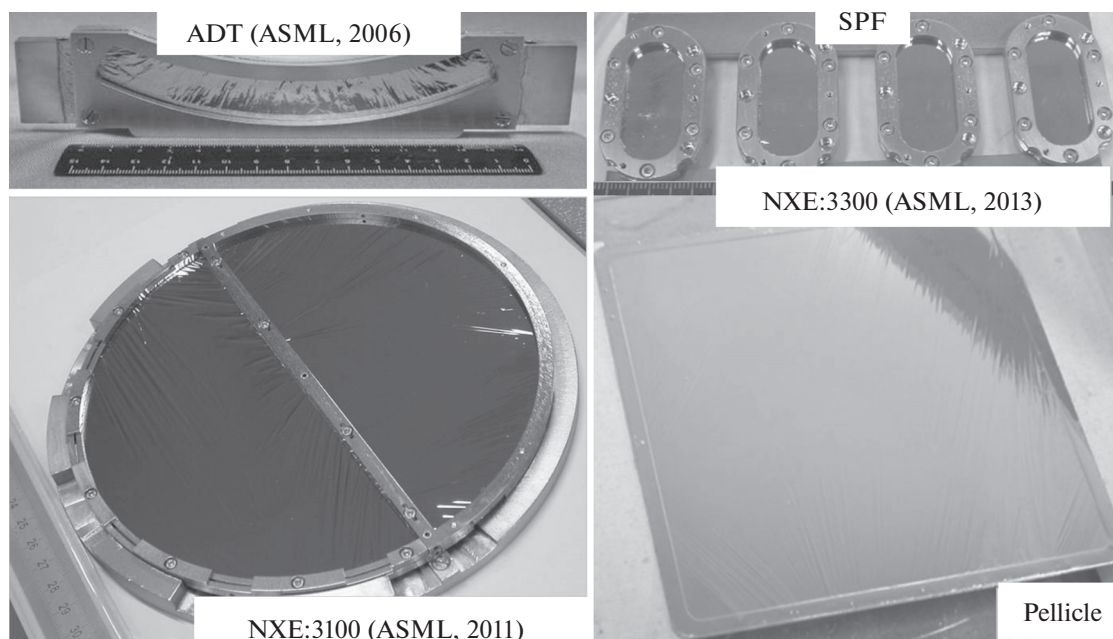


Рис. 5. Фотографии фильтров, разработанных в ИФМ РАН в различные годы для ЭУФ-литографов компании ASML, Нидерланды: ADT (Alpha-Demo-Tool) – первая установка для ЭУФ-литографии; NXE:3100 и NXE:3300 – литографические установки последующих поколений; SPF – фильтр спектральной очистки; pellicle – тонкая защитная пленка.

для чего толщина фильтра должна составлять 20–25 нм, большая рабочая апертура (может достигать 100–180 мм), высокая рабочая температура (600–800°C) и стойкость к химически агрессивной (как правило, H_2) среде. К требованиям также необходимо добавить определенные условия транспортировки фильтров, в том числе и на другие континенты.

Еще несколько лет назад такие требования казались абсолютно нереалистичными. Однако в процессе постепенного совершенствования технологии напыления и съема пленок с подложек, внедрения все новых и новых материалов в ИФМ РАН были разработаны методы изготовления фильтров, по своим техническим параметрам существенно превосходящих ближайшие аналоги. В частности, в ИФМ РАН были разработаны фильтры спектральной очистки, а в последней модификации и тонкие защитные пленки для всех ЭУФ-сканеров компании ASML (Нидерланды) (рис. 5).

Разработанные в ИФМ РАН фильтры широко используются практически во всех отечественных телескопах, предназначенных для изучения солнечной короны в ЭУФ-диапазоне [55, 56]. Из последних разработок следует отметить блокирующий фильтр для ракетного эксперимента Ni-C (NASA, 2012 г.) диаметром около 200 мм и обладающий рекордно большим (5×5 мм) размером ячейки поддерживающей сетки, к которой он приклеивается [57, 58]. Необходимость увеличе-

ния размера ячейки фильтра вызвана увеличенным пространственным разрешением ЭУФ-телескопов, приближающимся к дифракционному в ближайших миссиях [59].

Уникальными рентгенооптическими свойствами обладают изготовленные на базе свободновисящих структур фазосдвигающие пленки и поляризаторы, работающие “на пропускание”. Разработанная в ИФМ РАН технология изготовления таких рентгенооптических элементов отличается от ближайших аналогов [60] тем, что в многослойной интерференционной структуре нет поддерживающей мембраны Si_3N_4 . Благодаря отсутствию этой мембраны межслойная шероховатость в структуре упала почти в два раза, что, в частности, впервые позволило создать четвертьволновые пластинки для диапазона длин волн 3–5 нм и фазосдвигающие пластинки для длины волны около 2 нм [61, 62].

В настоящее время эти элементы широко используются в различных синхротронных центрах для анализа поляризационного состояния пучков МР- и ЭУФ-излучения. В обычной лабораторной практике поляризаторы и фазовращатели на основе свободновисящих структур пока не нашли широкого применения, однако в [10] такая возможность продемонстрирована. В связи с повышением мощности лабораторных источников МР- и ЭУФ-излучения считаем, что в ближайшее время они станут широко применяться, что суще-

ственно повысит доступность экспериментов с поляризованным рентгеновским излучением.

Основные задачи в рамках направления “Свободновисящая многослойная оптика”, которые предстоит решить в ближайшее время, следующие.

Несмотря на то, что в ИФМ РАН изготавливают фильтры спектральной очистки и тонкие защитные пленки с лучшими на сегодняшний день техническими параметрами, для использования в индустрии технология не годится, так как она во многом ручная. Поэтому сложнейшая задача — это разработка технологии создания фильтров и тонких пленок, которая позволит изготавливать эти элементы в “индустриальных” масштабах.

Не менее сложной представляется разработка фильтров для готовящихся в настоящее время отечественных проектов по изучению солнечной короны “АРКА” и “Интергелиозонд” [59, 63]. Специфика этих проектов по сравнению с предыдущими заключается в следующем. Во-первых, увеличенное на порядок пространственное разрешение требует увеличения размеров как самого фильтра, так и ячейки сетки, на которой фильтр крепится. Во-вторых, необходимо улучшить временное разрешение, что требует увеличения регистрируемого сигнала. Для фильтра это означает увеличение коэффициента пропускания при сохранении блокирующих длинноволновое излучение свойств и механической прочности. В проекте “Интергелиозонд” все эти проблемы обостряются тем, что телескоп будет работать около Солнца. Радиационная нагрузка на входной фильтр составит около 2 Вт/см². Поэтому дополнительным требованием к фильтру будет увеличенная радиационная и химическая стойкость. Очевидно, что для решения этих задач необходимы новые материалы. В частности, большие надежды возлагают на бериллий.

Развитие направления поляризаторов и фазовращателей предполагает в большей степени разработку методик прецизионного изучения поляризационных и фазосдвигающих свойств в лабораторных условиях и демонстрацию возможностей этих элементов в экспериментах по изучению элементов рентгенооптики, конденсированного вещества и биологических образцов.

4. ЗЕРКАЛА И СИСТЕМЫ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПУЧКОВ ЖЕСТКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Одним из наиболее успешных коммерческих направлений деятельности в ИФМ РАН является изготовление зеркал и систем для формирования пучков жесткого рентгеновского излучения. Основу составляют так называемые зеркала Гебеля [12], представляющие собой цилиндрические параболоиды или эллипсоиды (в зависимости от то-

го, что требуется: коллимация или фокусировка рентгеновского излучения) с нанесенной на поверхность многослойной структурой с переменным вдоль образующей цилиндра периодом (градиентом периода). Период подбирается таким образом, чтобы для каждой точки зеркала выполнялось условие Брэгга. Как правило, зеркала изготавливают в процессе изгиба по нужному закону тонкой кремниевой пластины с заранее нанесенной на нее многослойной интерференционной структурой и ее приклейки к металлической матрице [64]. Обычно эти элементы используют в диапазоне длин волн 0.05–0.25 нм в составе рентгеновских аппаратов для дифрактометрии и рентгенофлуоресцентного анализа. Коэффициенты отражения зеркал составляют 60–80%, а угловые ошибки — лучше 10⁻⁴ рад. Элементы применяются также в составе экспериментальных стендов на синхротронах.

Для двумерной коллимации и фокусировки используют скрещенные системы типа классической схемы Киркпатрика—Баеза либо ее модификации — двухуголковую, так называемую оптику Монтеля [65], и четырехуголковую, предложенную и впервые изготовленную в ИФМ РАН [66].

Теоретически большей эффективностью и простотой эксплуатации обладают зеркала в виде фигур вращения (чаще всего эллипсоиды и параболоиды). Однако из-за высокой стоимости подложек и сложности нанесения высококачественной отражающей многослойной интерференционной структуры на сильно изогнутую поверхность (меридиональный радиус кривизны ~1 см) значительного распространения эта технология не получила.

Основная задача, которая решается в ИФМ РАН, — разработать на основе реактивного ионно-плазменного распыления недорогую технологию изготовления фигур вращения. В настоящее время уже имеются первые экспериментальные результаты, указывающие на перспективы этого подхода. На рис. 6 приведены оптические схемы, поясняющие ход лучей, и фотографии изготавливаемых в настоящее время в ИФМ РАН элементов и систем, включающих эллипсоид вращения.

5. ОПТИКА ДИФРАКЦИОННОГО КАЧЕСТВА ДЛЯ МР- И ЭУФ-ДИАПАЗОНОВ

Под дифракционным качеством понимается обеспечение оптическими элементами и системами волновых фронтов или изображений, свойства которых ограничены только длиной волны света (дифракционными явлениями), а не дефектами. Дифракционный предел разрешения такой оптики составляет примерно половину длины волны $\lambda/2$. В оптическом диапазоне главным условием, определяющим соответствие качества

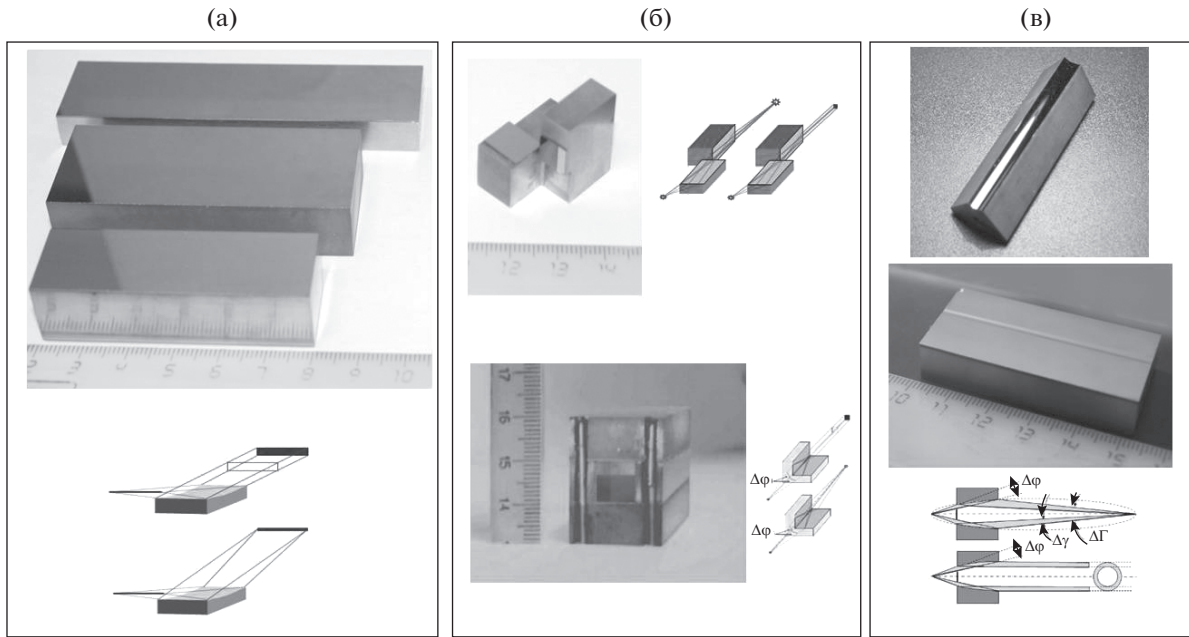


Рис. 6. Оптические схемы, поясняющие ход лучей, и фотографии изготавливаемых в настоящее время в ИФМ РАН элементов и систем: а – одиночные цилиндрические параболоиды и эллипсоиды; б – системы Киркпатрика–Баеза, Монтеля и четырехугольная; в – эллипсоид и параболоид вращения.

оптики дифракционному, является условие Маршалля, когда квадратный корень из среднеквадратичной величины основных aberrаций $RMS_{ab} < \lambda/14$ [67]. Считается в большинстве случаев, что неровности (шероховатости) меньших латеральных размеров могут влиять на фоновые засветки, но практически не влияют на разрешающую способность приборов.

Из-за того, что длина волны в МР- и ЭУФ-диапазонах на один–два порядка меньше, требования к поверхностям как минимум на один–два порядка жестче. В частности, строгий анализ влияния шероховатостей всех латеральных размеров – от десятков миллиметров (размер зеркала) до единиц нанометров – на качество изображения проекционного объектива на длине волны 13.5 нм показал, что эффективная шероховатость в интервале всех латеральных размеров должна быть на уровне 2–3 Å [68, 69]. Для МР-диапазона эти требования еще в два–три раза строже. В отличие от оптического диапазона наибольший отрицательный эффект на пространственное разрешение оказывают шероховатости среднечастотного диапазона с латеральными размерами от 1 мкм до 1 мм, приводящие к размытию краев изображения.

Для решения задачи создания оптики дифракционного качества в МР- и ЭУФ-диапазонах пришлось решать комплекс проблем, связанных с метрологическими измерениями, полировкой и формообразованием оптических поверхностей.

В метрологии решались следующие задачи. Была проведена полная ревизия возможностей традиционных методов изучения поверхности. Для каждого частотного диапазона были разработаны альтернативные, основанные на первых принципах методы изучения. На основе этих исследований либо определяли предельные возможности традиционного метода, либо, где это было возможно, метод модернизировали, либо проводили соответствующую калибровку.

Для изучения шероховатостей поверхностей в низкочастотном диапазоне (латеральные размеры от 1 мм до диаметра зеркала), так называемых ошибок формы, используют интерферометры (чаще всего Физо и Тваймана–Грина) с эталонными поверхностями [70]. Метод обладает высочайшей по отношению к эталону точностью измерения формы поверхности, до $\lambda/1000$ и меньше. Однако абсолютная точность измерений не превышает $\lambda/30$ – $\lambda/50$. В качестве метода изучения формы поверхности из первых принципов была разработана интерферометрия с дифракционной волной сравнения, использующая в качестве источника эталонной сферической волны одноволоконное оптическое волокно с субволновой выходной апертурой. Аберрации волнового фронта, измеренные методом Юнга, показали, что на данный момент этот источник обладает рекордно малой aberrацией, менее 0.1 нм при числовой апертуре $NA \approx 0.2$ и менее 0.3 нм при $NA \approx 0.4$ [71].

На основе этого источника в ИФМ РАН разработана серия интерферометров (рис. 7), включающая вакуумный интерферометр с вертикальным расположением оптической оси [72], позволяющий изучать элементы в той ориентации по отношению к гравитационному полю Земли, в какой они будут установлены в рабочем приборе. Интерферометры на виброизолирующих столах (оптическая ось горизонтальная) позволяют исследовать оптические системы с фокусными расстояниями до 5 м. Разработаны методики, позволяющие изучать самые различные оптические элементы и системы, включая асферические [73–78].

Для измерений среднечастотной шероховатости (латеральные размеры от 1 мкм до 1 мм) традиционно используются интерферометры белого света, также имеющие эталоны и требующие калибровки [79]. В качестве альтернативных методов были применены атомно-силовая микроскопия, диффузное рассеяние рентгеновского излучения и интерферометрия с дифракционной волной сравнения [80–83]. В эксперименте сравнивали три интерферометра белого света из разных лабораторий. В результате этих исследований было показано, что интерферометр удовлетворительно работает в случае подложек с эффективной шероховатостью более 1 нм. Для более гладких поверхностей наблюдается сильное рассогласование методов, в то время как результаты, полученные методами АСМ, интерферометрии с дифракционной волной сравнения и диффузного рассеяния рентгеновского излучения, хорошо совпадают друг с другом в областях перекрытия рабочих диапазонов каждого метода.

Микрошероховатости (латеральные размеры от 1 нм до 1 мкм) измеряют с помощью АСМ. Поскольку АСМ также нельзя считать методом, дающим информацию из первых принципов, то его проверку в длинноволновой области проводили с помощью диффузного рассеяния рентгеновского излучения с длиной волны 0.154 нм, а в коротковолновой – на специально разработанном рефлектометре с рабочей длиной волны 13.5 нм [84]. Эти исследования подтвердили адекватность АСМ, в том числе и для измерения сверхгладких поверхностей.

На практике для каждой поверхности проводить такое исследование неэффективно, достаточно только периодически проверять работоспособность АСМ (партии зондов отличаются друг от друга) и осуществлять калибровку интерферометра белого света по описанной выше методике.

Адекватные измерения шероховатости позволили совместно с Физическим институтом им. П.Н. Лебедева РАН (ФИ РАН) усовершенствовать процесс химико-механической полировки. В результате при полировании плавленого

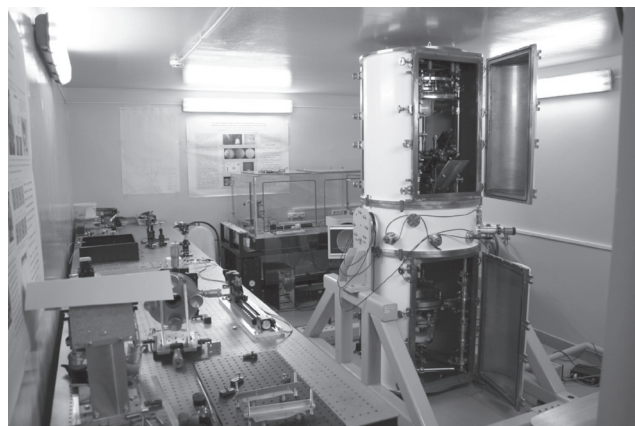


Рис. 7. Фотография лаборатории, в которой установлены интерферометры.

кварца и оптической керамики ULE удалось достичь мирового уровня полировки, обеспечивающего эффективную шероховатость 0.22 нм в диапазоне пространственных частот 0.01–100 мкм⁻¹ [85, 86].

Для дальнейшего улучшения шероховатости, а также коррекции локальных ошибок и асферизации формы в ИФМ РАН развивают ионно-пучковые методы обработки оптических поверхностей. Для этих целей была разработана специальная установка, оснащенная гониометром с пятью степенями свободы, что позволяет обрабатывать поверхности произвольной формы размером до 300 мм. Ионное травление проводят с помощью трех ионных пушек с диаметром пучка 200, 100 мм и с изменяющимся диаметром от 1 до 10 мм. Найдены оптимальные параметры процесса ионно-пучковой обработки, разработаны алгоритмы коррекции локальных ошибок и асферизации, которые позволяют уже сейчас изготавливать оптику дифракционного качества для ЭУФ- и в ближайшей перспективе для МР-диапазонов [87–90].

Таким образом, маршрут изготовления сверхточной детали выглядит следующим образом (рис. 8). Вначале проводят ионную полировку поверхности, далее ее металлизуют для повышения интерференционного контраста. Форму поверхности изучают с помощью интерферометра. После анализа полученной карты поверхности ее форму корректируют ионным пучком, и цикл повторяется до тех пор, пока параметры не будут удовлетворять техническому заданию.

Подводя итог раздела, посвященного оптике дифракционного качества, можно сказать, что в ИФМ РАН создан комплекс методов и оборудования, позволяющий изготавливать и паспорттировать подложки дифракционного качества для ЭУФ- и частично для МР-диапазонов. Это направление постоянно развивается, есть еще масса нерешенных проблем, однако наиболее важной

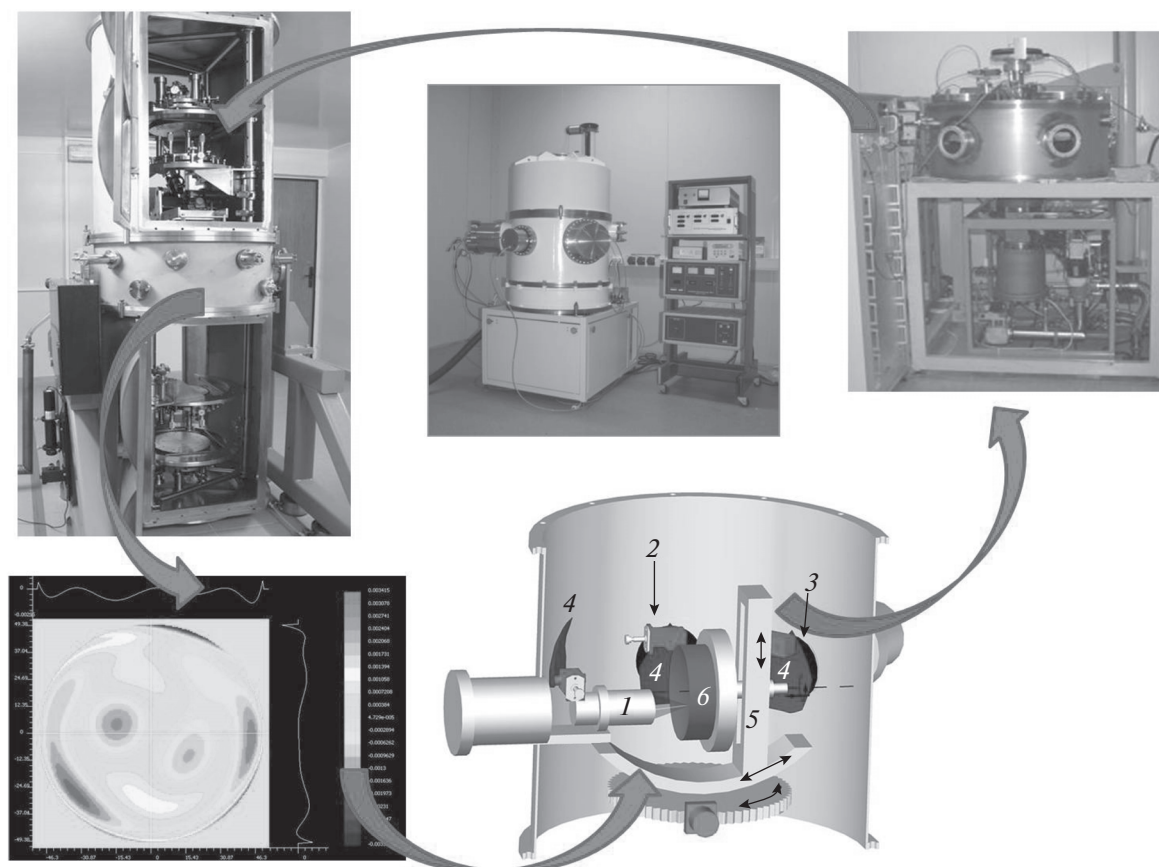


Рис. 8. Наглядная иллюстрация маршрута изготовления оптики дифракционного качества: 1 – источник сфокусированного ионного пучка; 2 – источник ионов с горячим катодом; 3 – высокочастотный ионный источник; 4 – заслонка с дополнительной функцией измерителя тока ионного пучка; 5 – стол с пятью степенями свободы; 6 – обрабатываемая ионным пучком оптическая деталь.

на данный момент является разработка установки ионно-пучкового травления и интерферометра с дифракционной волной сравнения для оптической промышленности. Это связано с огромным потенциалом для индустрии ионно-пучковых методов обработки оптических поверхностей с одной стороны, и с тем, что разработанная установка на основе отечественных комплектующих по основным техническим характеристикам превосходит зарубежные аналоги, с другой. По точности разработанный интерферометр более чем на порядок превосходит ближайшие зарубежные аналоги и благодаря оптоволоконным технологиям имеет существенно меньшие размеры и стоимость.

6. НАПРАВЛЕНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ ОПТИКИ ДИФРАКЦИОННОГО КАЧЕСТВА, РАЗВИВАЕМЫЕ В ИФМ РАН

Данный раздел посвящен развиваемым в ИФМ РАН в соавторстве с коллегами из ФИ РАН, Института прикладной физики РАН (ИПФ РАН)

и ЦНИИмаш (г. Королев) направлениям применения оптики дифракционного качества для МР- и ЭУФ-диапазонов.

6.1. Солнечная астрономия. С 80-х годов прошлого века ИПФ АН, а сейчас ИФМ РАН, вовлечены в исследования физики Солнца, проводимые в Институте космических исследований РАН и ФИ РАН. В рамках этих исследований ИФМ РАН разрабатывал и изготавливал для телескопов аттестованные многослойные зеркала и фильтры. Основную информацию о физических процессах на Солнце получают в результате исследования короны. Выбор диапазона длин волн 10–60 нм вызван тем, что в нем лежат наиболее интенсивные спектральные линии, характерные для различных состояний Солнца и температур короны. Последняя миссия с изготовленными зеркалами – это обсерватория на борту российского спутника Коронас-Фотон (2009 г.) [57]. Телескоп ТЕСИС имел угловое разрешение около 1.8" (~1300 км на Солнце). Это близко к рекордному разрешению ~1" американского телескопа TRACE. Однако

этот телескоп видит примерно 1/10 диска Солнца, в то время как ТЕСИС – площадь, большую, чем диск. На рис. 9 приведены изображения Солнца, снятые телескопом ТЕСИС на различных длинах волн.

В результате моделирования, а также экспериментальных наблюдений с помощью телескопов ТЕСИС, Hi-C и IRIS (запущены NASA) стала понятной необходимость увеличения пространственного разрешения телескопов до значения менее 100 км, чтобы исследовать механизмы нагрева короны (температура поверхности ~ 6000 К, температура короны $> 10^6$ К), пополнения короны веществом и решить другие фундаментальные проблемы физики Солнца. В настоящее время ИФМ РАН участвует в двух проектах – “АРКА” и “Интергелиозонд”, которые уже упоминались выше. Помимо указанных выше задач, связанных с изготовлением многослойных зеркал дифракционного качества и фильтров с улучшенными рентгенооптическими характеристиками, проблемой является закрепление зеркал в металлические оправы без искажения их формы. Проблема усугубляется еще и тем обстоятельством, что изготовление зеркал и окончательная настройка телескопа проводится на Земле, в то время как в космосе деформации поверхности, вызванные массивностью деталей, исчезнут. Для решения этой проблемы в ИФМ РАН проводится моделирование всех указанных эффектов и анализируются различные конструкции узла зеркала.

6.2. Мониторинг околоземного пространства в ВУФ- и УФ-диапазонах. Относительно новым направлением исследований является разработка телескопов для космического мониторинга околоземного пространства в вакуумном ультрафиолетовом и ультрафиолетовом диапазонах (длины волн 100–300 нм). С их помощью решаются две основные проблемы: исследование ионосферы и обнаружение слабо светящихся движущихся объектов в ближнем космосе на фоне дневной атмосферы. В России таких телескопов нет. Спецификой этого диапазона является следующее. Во-первых, из-за сильного поглощения оптических материалов и сложности корректировки хроматических aberrаций телескоп может быть только зеркальным. Во-вторых, из-за меньшей рабочей длины волны кратно возрастают требования к допустимой величине шероховатости и ошибкам формы зеркал. В-третьих, большие потери при каждом отражении ограничивают число зеркал в оптической схеме. В случае систем космического базирования предъявляют дополнительные требования к массогабаритным характеристикам приборов. Поэтому в настоящее время для этого диапазона используют телескопы по схеме Ричи–Кретьена, основным недостатком которой является низкое, менее 1° , поле зрения. С практической точки зрения такой телескоп не перекры-

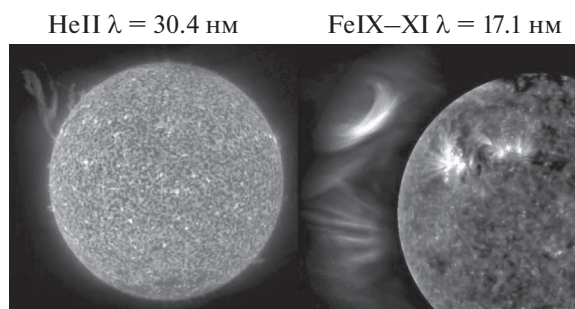


Рис. 9. Спектр излучения солнечной короны, характерный для различных состояний Солнца.

вает крупные регионы России даже с геостационарной орбиты.

В ИФМ РАН была предложена полнозеркальная модифицированная схема Шмидта–Кассегрена, которая на практике позволила увеличить поле зрения в три–четыре раза (до 3°) при сохранении углового разрешения на секундном уровне. Компенсация сферических aberrаций и астигматизма достигается за счет использования внеосевого planoидного зеркала. Схема достаточно простая, но не была реализована ранее из-за сложности изготовления асферического зеркала. Применяется неосесимметричная асферика шестого порядка, которую невозможно выполнить традиционным методом механического формообразования. Используя описанные выше методы ионно-пучковой обработки, удалось сделать такое асферическое зеркало с параметрами, практически совпадающими с расчетными. Был изготовлен комплект зеркал и проведено тестирование оптических характеристик макета телескопа. Все принципы, положенные в основу этой схемы, на практике подтвердились в полном объеме [11]. Диаметр пятна фокусировки в фокальной плоскости оказался на 16% больше расчетного, что объясняется остаточной aberrацией, которая при необходимости может быть уменьшена.

Эта схема по полю зрения в разы превзошла ближайшие мировые аналоги и является весьма перспективной для разработки телескопов в целях мониторинга околоземного пространства в ВУФ- и УФ-диапазонах. Также ее можно использовать в составе гиперспектральной аппаратуры, расширяя ее рабочий диапазон до ВУФ- и УФ-областей.

В рамках развития этой схемы в ближайшее время будут вестись работы по следующим направлениям: увеличение апертуры входного зеркала до 300 мм (повышение чувствительности); увеличение поля зрения до 5° ; разработка концепции гиперспектрального телескопа (расширение рабочего диапазона до видимой и ИК-областей); разработка концепции телескопа со скани-

рованием по полю зрения (расширение зоны наблюдения, например, одним телескопом всего пространства над Россией); разработка летного образца телескопа.

6.3. Микроскопия в диапазоне мягкого рентгена.

Микроскопия в диапазоне мягкого рентгена обладает рядом преимуществ по сравнению с другими видами микроскопии. Во-первых, благодаря резонансному поглощению электронами внутренних оболочек наблюдается сильный абсорбционный контраст в легких веществах, и в отличие от электронной или оптической микроскопии не требуется химическое контрастирование образцов. Во-вторых, как и электронная микроскопия, потенциально обладая нанометровым пространственным разрешением, мягкая рентгеновская микроскопия позволяет изучать образцы толщиной до десятка микрометров, в то время как электронная, из-за сильного рассеяния, — не более 0.1–0.3 мкм. Более того, вследствие относительно невысокого поглощения в области прозрачности воды (длины волн 2.3–4.4 нм) образцы можно помещать в кюветы толщиной до 1 мм, заполненные влажным воздухом при нормальном давлении, т.е. изучать живые образцы. В-третьих, практически полное отсутствие рассеяния (на пять порядков меньше, чем поглощение) существенно упрощает томографические исследования, сводя их к перемещению образца вдоль оптической оси. Подробное описание достоинств мягкой рентгеновской микроскопии для изучения биологических (в общем случае органических) образцов можно найти в [3].

Микроскопия в диапазоне мягкого рентгена представляет новые возможности для изучения микро- и наноманетизма, используя эффекты магнитного дихроизма поглощения и нанометровое пространственное разрешение [4]. Несмотря на большое число появившихся в последние годы публикаций на тему лабораторных рентгеновских микроскопов [91–94], использование этого поистине уникального метода нанодиагностики вещества в лабораторной практике крайне ограничено. Основными причинами этого являются: низкая интенсивность зондового рентгеновского пучка; низкое (на уровне 40–60 нм) пространственное разрешение; ограниченный (как правило, $\lambda < 4$ нм) рабочий диапазон длин волн и невозможность проведения в лаборатории экспериментов с поляризованными рентгеновскими пучками. Поэтому основные достижения с использованием мягкой рентгеновской микроскопии были получены в синхротронных центрах. Наилучшее разрешение в этих экспериментах составило 12–15 нм [4, 5].

Основной проблемой лабораторной микроскопии является использование в качестве изображающих элементов зонных пластинок Френе-

ля. Хроматические aberrации, низкая геометрическая и числовая апертуры “вырезают” из источника излучения очень узкую угловую и спектральную часть. В совокупности с невысокой (на уровне 10%) дифракционной эффективностью они резко уменьшают интенсивность зондового пучка. Как правило, для получения качественного изображения требуется накопление сигнала за продолжительный промежуток времени. В этом случае вибрации и локальные нагревы исследуемого образца уже становятся важными факторами, влияющими на пространственное разрешение.

Как показало сравнение микроскопов на основе зонных пластинок Френеля и многослойных зеркал, интенсивность зондового пучка в случае многослойных зеркал может превышать от одного до трех порядков в зависимости от длины волны, и она растет по мере продвижения в длинноволновую, наиболее интересную для ряда приложений область [2, 95]. Имеющиеся немногочисленные аналоги зеркальных микроскопов из-за применения “обычных” зеркал в проекционной моде не обеспечивают высокого пространственного разрешения и поэтому используются в режиме контактного микроскопа, когда сразу за исследуемым образцом устанавливается рентгеновская пленка, абсорбционное изображение с которой впоследствии оцифровывается [96, 97].

В ИФМ РАН в последние годы развивается концепция рентгеновского микроскопа на основе многослойных рентгеновских зеркал нормального падения. Основным преимуществом являются развитые технологии изготовления и метрологические измерения подложек дифракционного качества для МР- и ЭУФ-диапазонов, позволяющие как изготавливать зеркала, так и настраивать проекционный объектив, минимизируя его aberrации. На рис. 10 приведены оптическая схема и фотография микроскопа, а также и изображения тест-объектов, полученных с помощью разработанного в ИФМ РАН микроскопа на длине волны 13.5 нм [98]. Особенностью микроскопа является то, что он впервые позволяет исследовать образцы как в проекционной моде с регистрацией изображения на ССД-камеру, так и в контактной, когда образец помещается на пластинку с фоторезистом. В первой моде с учетом десятикратного увеличения рентгеновского объектива разрешение составляет 70 нм [99], во второй — 30 нм.

В настоящее время начата разработка рентгеновского микроскопа для “водного” и “углеродного” окон прозрачности (длины волн 3.1–5 нм) с рентгеновским увеличением 50× и 1000× и который должен обеспечить разрешение 20 нм.

6.4. Проекционная литография на длине волны 13.5 нм и в МР-диапазоне. С проекционной ЭУФ-литографией на длине волны 13.5 нм (в перспек-

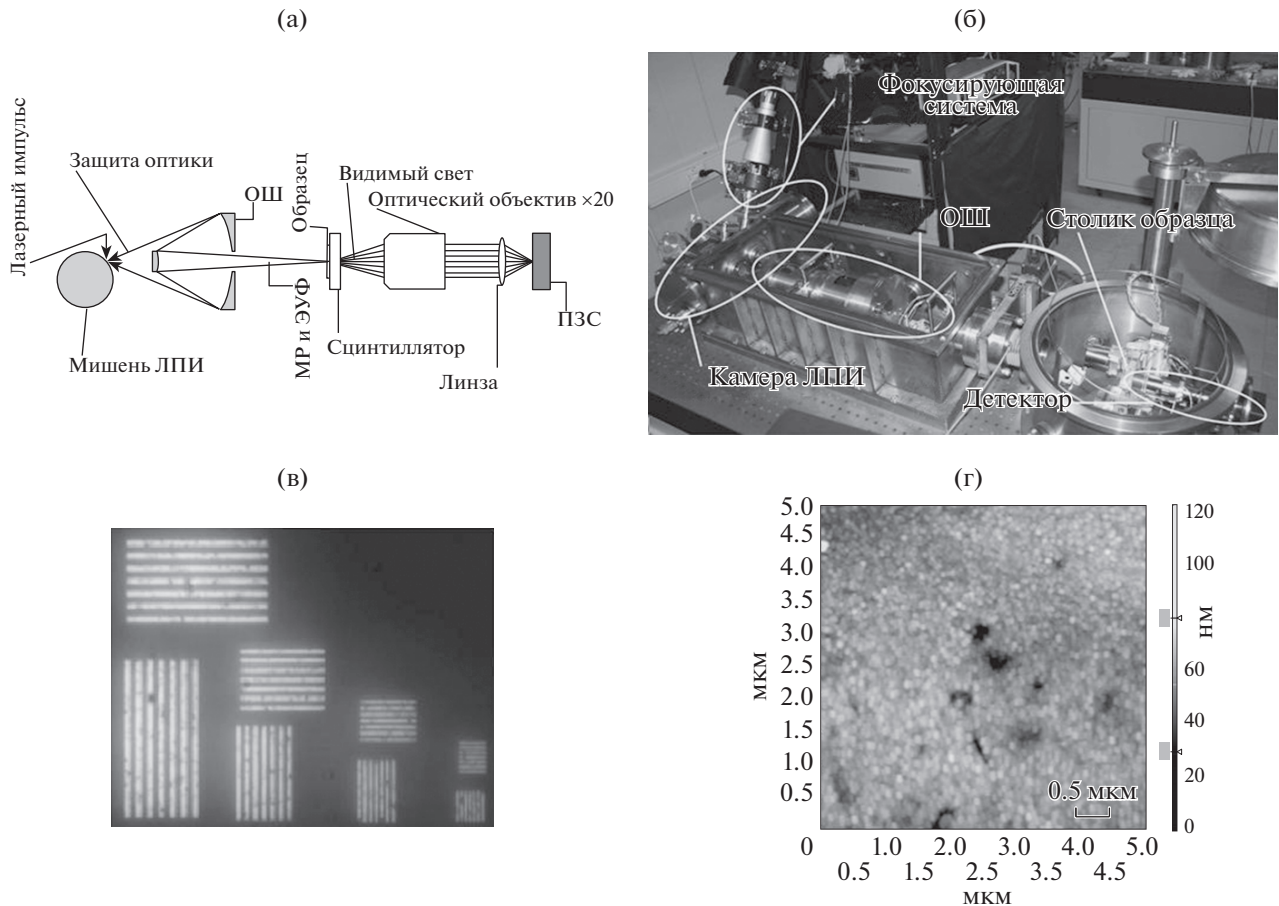


Рис. 10. Оптическая схема (а), фотография (б) рентгеновского микроскопа, разработанного в ИФМ РАН: ЛПИ – лазерно-плазменный источник МР- и ЭУФ-излучения; ПЗС – прибор с зарядовой связью; ОШ – объектив Шварцшильда. Полученные с помощью микроскопа изображения тест-объектов: в – окон различной ширины в хромовой пленке толщиной 150 нм, изготовленных методом электронно-лучевой литографии; г – пористого майлара толщиной 2 мкм.

тиве с меньшей длиной волны) при сохранении существующей парадигмы, что фотолитография является наиболее производительной технологией формирования топологии микросхем, связывают будущее микроэлектроники и дальнейшее уменьшение топологических размеров на чипах до 5 нм [100]. Уже сейчас продемонстрировано, что благодаря кратному уменьшению количества масок и технологических операций на чипе стоимость литографического процесса на длине волны 13.5 нм меньше, чем в случае традиционной литографии на длине волны 193 нм, начиная с топологических размеров 32 нм [8].

Нерешенными проблемами, препятствующими внедрению ЭУФ-литографии в массовое производство, являются: отсутствие источника излучения, обеспечивающего требуемый уровень мощности и надежности работы; отсутствие сверхтонких пленок для защиты уникальных и дорогостоящих масок от загрязнений продуктами эрозии источника ЭУФ-излучения и фильтров

спектральной очистки, удовлетворяющих требованиям для использования в промышленности. Имея опыт развития ЭУФ-литографии, когда от старта научно-исследовательской работы до создания предпроектной установки литографии потребовалось около 20 лет, необходимо уже сейчас начать исследования по поиску более короткой длины волны для литографии следующего поколения. Еще одной проблемой, которая не представляет интереса для мира, однако важна с точки зрения технологической безопасности страны, является развитие научно-технических заделов в такой области, которая может стать ключевой для микроэлектроники будущего.

Участие ИМФ РАН в решении глобальных проблем ЭУФ-литографии в настоящее время сводится к следующему. Во-первых, разработка совместно с ИПФ РАН альтернативного (сейчас это мощные лазерные системы CO₂) источника ЭУФ-излучения на основе терагерцового гиротрона [101, 102]. Во-вторых, разработка сверхтон-

ких пленок и фильтров спектральной очистки, удовлетворяющих требованиям индустрии. В-третьих, поиск более короткой длины волны для литографии следующего поколения. В свое время в качестве перспективной длины волны была предложена 6.7 нм [103]. Первый патент на эту тему был получен в соавторстве с командой из ASML (Нидерланды) [104]. Однако в [49] в результате анализа современного состояния дел в разработке источников излучения, достигнутых коэффициентов отражения многослойных интерференционных структур в этой области и чувствительности резистов были объективно показаны не очень хорошие перспективы этой длины волны. Было начато изучение возможностей многослойной оптики и лабораторных источников излучения в области 11 нм. Как показывают расчеты с использованием многослойной оптики Ru(Mo)/Be, можно ожидать большей в полтора раза эффективности отражения, а в качестве рабочего материала источника излучения использовать не олово, требующее разработки очень сложных систем защиты от загрязнений, а газ ксенон, практически не приводящий к загрязнению оптических элементов. Анализ литературных данных показывает, что ксеноновый источник в области 11 нм может иметь коэффициент конверсии не меньше, чем оловянный в области 13.5 нм.

Достижения в области экспериментальной литографии пока скромные. Тем не менее, именно в ИФМ РАН впервые в России (2011 г.) был создан экспериментальный стенд отечественного ЭУФ-литографа, который позволяет проводить эксперименты и отрабатывать методики ЭУФ-литографии [105]. В частности, с использованием этого стенда совместно с институтом химии при ННГУ им. Н.И. Лобачевского были разработаны отечественные фоторезисты для длины волны 13.5 нм с параметрами, не уступающими мировым аналогам [106]. В этом году сотрудники ИФМ РАН приступили к изготовлению нового объектива по технологии, описанной выше, и есть надежда получить расчетное разрешение 27 нм.

Еще одна задача, которой в настоящее время никто не занимается, но которая, безусловно, имеет свою нишу в литографии будущего – это “безмасочная” ЭУФ-литография. Ее основное преимущество перед электронной литографией в том, что даже с маломощным источником производительность ЭУФ-литографа на несколько порядков больше. Такие приборы могут найти применение в научно-технологических разработках и мелкосерийном производстве. Разработка концепции такой литографии (однолучевая или многолучевая, оптическая схема, оптимальный источник ЭУФ-излучения, рабочая длина волны) является крайне актуальной задачей, и которой следует заниматься в будущем.

7. МНОГОСЛОЙНАЯ ОПТИКА ДЛЯ АТТОФИЗИКИ

В последнее время в связи с разработкой сверхмощных лазерных систем петаваттного и мультипетаваттного класса, в том числе в ИФМ РАН, появилась реальная возможность формирования атто- и субаттосекундных импульсов электромагнитного излучения, позволяющих изучать динамику атомных и даже ядерных переходов с беспрецедентным временным разрешением. Для транспортировки, фокусировки и спектрального анализа этого излучения нужна соответствующая оптика. Нетрудно показать, что спектр таких импульсов лежит в диапазонах мягкого и даже жесткого рентгена. Так как спектр излучения широк, порядка несущей длины волны, то для предотвращения “размытия” волнового пакета спектр отражения должен быть достаточно широк. Поэтому для управлениями атто- и субаттосекундными импульсами необходимо использовать аперийные многослойные зеркала с более широкой полосой отражения, чем у периодических многослойных интерференционных структур. Более того, оптимизируя состав аперийной многослойной структуры, можно пытаться даже уменьшить длительность аттосекундных импульсов.

Одной из актуальнейших задач, решаемых с помощью мощных лазерных систем, является формирование сверхсильных электромагнитных полей. Переход из оптического диапазона в рентгеновский позволяет осуществить нанометровую фокусировку излучения. В совокупности с укорочением длительности импульса от фемтосекунд до аттосекунд это позволит повысить интенсивность полей в пятне фокусировки на несколько порядков, и теоретически можно ожидать плотностей мощности до 10^{28} – 10^{30} Вт/см².

Для достижения этих целей будут решаться следующие задачи. Во-первых, будут разработаны новые материалы для подложек, обладающие высокой теплопроводностью. В качестве кандидатов рассматривали алюминиевые подложки с выращенным на поверхности слоем оксида [107]. Однако этот материал не удовлетворяет требованиям, предъявляемым к микрошероховатости поверхности. Для решения этой проблемы совместно с ОАО “Композит”, г. Королев, была начата разработка методики суперполировки с привлечением ионно-пучкового травления, бериллиевых подложек.

Необходимым условием успешного применения многослойной оптики для аттофизических исследований является необходимость развития технологий изготовления, методов аттестации рентгенооптических свойств и, что самое сложное, решение обратной задачи, т.е. восстановление внутреннего строения многослойной структуры до уровня, характерного для изучения пери-

одических структур. Эти задачи являются приоритетными для ИФМ РАН на ближайшее будущее по направлению многослойной оптики для аттофизики [108].

Также активно решается проблема рентгеновской диагностики в экспериментах по изучению взаимодействия мощных лазерных импульсов с веществом. Одним из последних результатов стала разработка рентгенооптической системы с пространственным разрешением до 70 нм [99].

8. КЛАСТЕРНЫЕ ИОННЫЕ ПУЧКИ

Последнее научное направление, которое начало развиваться около года назад, — это формирование, изучение и применение в научных и технологических исследованиях кластерных ионных пучков. Кластерные пучки представляют значительный научный интерес по следующим причинам. Во-первых, повышение локальной плотности газа в области возбуждения при относительно невысоком базовом давлении газа в установке должно привести к увеличению эффективности взаимодействия с лазерным и СВЧ-излучением, а значит, можно ожидать интегрального повышения эффективности этих источников. Во-вторых, возможна генерация излучения в ЭУФ- и МР-диапазонах в непрерывном режиме по аналогии с рентгеновской трубкой, без использования каких-либо средств накачки, а просто при взаимодействии ускоренных кластерных пучков с мишенью. Наибольший интерес такой источник представляет для безмасочной литографии. В-третьих, при взаимодействии ускоренных кластерных пучков с твердотельной мишенью или при встречном взаимодействии локальная плотность плазмы и ее температура могут обеспечить условия для генерации квазимолекулярного широкополосного излучения. Ранее такое излучение наблюдалось в жестком рентгеновском диапазоне при взаимодействии ускоренных ионов с твердотельными мишенями. Самая длинноволновая генерация излучения квазимолекулами наблюдалась в экспериментах с ускоренными ионами аргона в области 1–1.5 кэВ [109]. Квазимолекулы в ЭУФ- и МР-диапазонах, тем более с использованием кластерных пучков, никогда не изучали.

Вторая тематика с использованием кластерных пучков связана с обработкой и формообразованием оптических поверхностей. Одно из направлений — это полировка. В ряде работ, например [110], было показано, что с помощью ускоренных кластерных пучков можно существенно уменьшить шероховатость. Из-за методологии измерения шероховатостей (фактически изучали только микрошероховатости) приведенные авторами результаты нельзя считать всеобъемлющими и напрямую применять к сверхгладким поверхностям. Тем не менее, изучение воз-

можностей, которые дают кластерные пучки для окончательной полировки поверхностей, представляет колоссальный интерес по следующим причинам. Во-первых, в отличие от ионно-пучковой полировки кластеры практически не проникают в глубь подложки и, соответственно, не приводят к формированию нарушенного слоя. Во-вторых, основной механизм распыления подложки в случае кластеров термический, за счет локального нагрева поверхности до температуры плавления. В частности, это позволяет надеяться на возможность полировки не только аморфных, но и поликристаллических материалов, например, металлов.

Второе направление исследований, перспективы которого вытекают из термического механизма воздействия на поверхность — это формообразование (асферизация) с помощью кластерных пучков. Как показало сравнение ионных пучков и кластеров, скорость съема материала в случае кластеров на один–два порядка больше [111]. Если при ионно-пучковой обработке подложек на практике удастся проводить асферизацию на глубину порядка 10 мкм [85], то с использованием кластерных пучков — как минимум на порядок больше. В случае подтверждения этих ожиданий можно будет говорить о прорыве в области прецизионного изготовления асферических оптических элементов.

9. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На примере исследований, проводимых в ИФМ РАН, дается обзор современного состояния дел и перспектив развития многослойной рентгеновской оптики. Отмечается, что достигнутые научные и технологические результаты позволяют уже сейчас говорить о возможном прорыве в освоении коротковолнового диапазона длин волн. Полученные результаты востребованы не только в оптике для МР- и ЭУФ-диапазонов, но и при решении традиционных оптических задач. В частности, разработанные методы измерений шероховатости и формы оптических поверхностей выявили проблемы и недостатки традиционных методов исследования и позволяют создать новую эталонную базу для калибровки оптических приборов. Разработанные методы асферизации позволяют существенно упростить технологию прецизионного изготовления асферических оптических элементов, обеспечивая большую точность при меньших трудозатратах.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 13-02-00377, № 14-02-00549, № 15-02-07753 и № 15-42-02139).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Platonov Y., Rodriguez J., Kriese M., Gullikson E. et al.* // *Proceed. SPIE*. 2011. V. 8076. P. 80760N-2. doi 10.1117/12.889519
2. *Барышева М.М., Пестов А.Е., Салащенко Н.Н., Торопов М.Н., Чхало Н.И.* // *Успехи физических наук*. 2012. Т. 182. С. 727. doi 10.3367/UFNe.0182.201207c.0727
3. *Kirz J., Jacobsen C., Howells M.* // *Rev. Biophys.* 1995. V. 28. P. 130. doi 10.1017/S0033583500003139
4. *Fischer P.* // *Materials today*. 2010. V. 13. № 9. P. 14. doi 10.1016/S1369-7021(10)70161-9
5. *Chao W., Harteneck B.D., Liddle J.A., Anderson E.H., Atwood D.T.* // *Nature Lett.* 2005. V. 435. № 30. P. 1210. doi 10.1038/nature03719
6. *Schneider G., Rehbein S., Werner S.* // *Springer Ser. Opt. Sci.* 2008. V. 137. P. 137. doi 10.1007/978-3-540-74561-7_8
7. *Салащенко Н.Н., Чхало Н.И.* // *Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед.* 2012. № 6. С. 3.
8. *Wood O., Arnold J., Brunner T. et al.* // *Proceed. SPIE*. 2012. V. 8322. P. 832203. doi 10.1117/12.916292
9. *Hermans J.V., Laidler D., Foubert P. et al.* // *Proceed. SPIE*. 2012. V. 8322. P. 832202. doi 10.1117/12.917616
10. *Andreev S.S., Bibishkin M.S., Chkhalo N.I., Lopatin A.Ya. et al.* // *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*. 2005. V. 543. P. 340. doi 10.1016/j.nima.2005.01.252
11. *Brychikhin M.N., Chkhalo N.I., Eikhorn Ya.O., Malyshv I.V., Pestov A.E., Plastinin Yu.A., Polkovnikov V.N., Rizvanov A.A., Salashchenko N.N., Strulya I.L., Toropov M.N.* // *Appl. Opt.* 2016. V. 55. № 16. P. 4430.
12. *Schuster M., Gobel H.* // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 1995. V. 28. P. A270. doi 10.1088/0022-3727/28/4A/053
13. *Hu M.H., Le Guen K., Andre J.M., Jonnard P. et al.* // *Opt. Express*. 2010. V. 18. P. 20019. doi 10.1364/OE.18.020019
14. *Chkhalo N.I., Kunstner S., Polkovnikov V.N., Salashchenko N.N. et al.* // *Appl. Phys. Lett.* 2013. V. 102. P. 011602. doi 10.1063/1.4774298
15. *Zuev S.Y., Kuzin S.V., Polkovnikov V.N., Salashchenko N.N.* // *Bull. Russ. Acad. Sci.* 2010. V. 74. P. 50. doi 10.3103/S1062873810010132
16. *Andreev S.S., Salashchenko N.N., Suslov L.A., Yablonsky A.N., Zuev S.Y.* // *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*. 2001. V. 470. P. 162. doi 10.1016/S0168-9002(01)01018-X
17. *Andreev S.S., Kluev E.B., Misinov A.L., Polkovnikov V.N. et al.* // *J. Surf. Invest.: X-ray, Synchrotron Neutron Tech.* 2005. № 2. P. 45.
18. *Андреев С.С., Бибишкин М.С., Кимура Х., Клюенков Е.Б. и др.* // *Изв. акад. наук. Сер. физ.* 2004. Т. 68. № 4. С. 565.
19. *Дроздов М.Н., Дроздов Ю.Н., Клюенков Е.Б., Лопатин А.Я. и др.* // *Изв. акад. наук. Сер. физ.* 2011. Т. 75. № 1. С. 80.
20. *Kearney P.A., Moore C.E., Tan S.I., Vernon S.P., Levesque R.A.* // *J. Vac. Sci. Technol. B*. 1997. V. 15. P. 2452. doi 10.1116/1.589665
21. *Забродин И.Г., Закалов Б.А., Каськов И.А., Клюенков Е.Б. и др.* // *Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед.* 2013. № 7. С. 37.
22. *Polkovnikov V.N., Salashchenko N.N., Chkhalo N.I., Tsybin N.N., Zuev S.Yu.* // *Proceed. SPIE Europ. Conf. on Optics and Optoelectronics*. Prague, 2015. P. 113.
23. *Bogachev S.A., Chkhalo N.I., Kuzin S.V., Pariev D.E. et al.* // *Appl. Opt.* 2016. V. 55. № 9. P. 2126. doi 10.1364/AO.55.002126
24. *Вайнер Ю.А., Пестов А.Е., Прохоров К.А., Салащенко Н.Н. и др.* // *Журн. exper. и теор. физики*. 2006. Т. 130. № 3. С. 401.
25. *Makhotkin I.A., Zoethout E., van de Kruijs R., Yakunin S.N. et al.* // *Opt. Express*. 2013. V. 21. P. 1610. doi 10.1364/OE.21.029894
26. *Windt D.L., Bellotti J.A.* // *Appl. Opt.* 2009. V. 48. P. 4932. DOI: doi 10.1364/AO.48.004932
27. *Zhu J., Zhou S., Li H., Huang Q. et al.* // *Appl. Opt.* 2010. V. 49. P. 3922. doi 10.1364/AO.49.003922
28. *Берлин Е.В., Сейдман Л.А.* *Ионно-плазменные процессы в тонкопленочной технологии*. М: Техносфера, 2010. 528 с.
29. *Andreev S.S., Bibishkin M.S., Chkhalo N.I., Kluev E.B. et al.* // *J. Synchr. Rad.* 2003. V. 10. № 5. P. 358.
30. *Bibishkin M.S., Chkhalo N.I., Fraerman A.A., Pestov A.E. et al.* // *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*. 2005. V. 543. P. 333. doi 10.1016/j.nima.2005.01.251
31. *Andreev S.S., Akhsakhalyan A.D., Bibishkin M.S., Chkhalo N.I. et al.* // *Central Europ. J. Phys.* 2003. V. 1. P. 191. doi 10.2478/BF02475561
32. *Бибишкин М.С., Забродин И.Г., Зюев С.Ю., Клюенков Е.Б. и др.* // *Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед.* 2005. № 2. С. 23.
33. *Бибишкин М.С., Забродин И.Г., Клюенков Е.Б., Салащенко Н.Н. и др.* // *Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед.* 2003. № 2. С. 41.
34. *Догадин В.О., Зюев С.Ю., Салащенко Н.Н., Чхало Н.И., Шербаков А.В.* // *Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед.* 2015. № 7. С. 77.
35. *Chkhalo N.I., Gaikovich P.K., Salashchenko N.N., Yunin P.A., Zuev S.Yu.* // *Thin Solid Films*. 2016. V. 598. P. 156. doi 10.1016/j.tsf.2015.11.081
36. *Chernov V.A., Chkhalo N.I., Kovalenko N.V., Mytnichenko S.V.* // *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*. 1995. V. 359. P. 138. doi 10.1016/0168-9002(94)01679-8
37. *Chernov V.A., Erofeev V.I., Chkhalo N.I., Kovalenko N.V. et al.* // *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*. 1998. V. 405. P. 310. doi 10.1016/S0168-9002(97)00174-5
38. *Chernov V.A., Chkhalo N.I., Fedorchenko M.V., Kruglyakov E.P. et al.* // *J. X-Ray Sci. Technol.* 1995. V. 5. P. 389. doi 10.3233/XST-1995-5404
39. *Chernov V.A., Chkhalo N.I., Fedorchenko M.V., Kruglyakov E.P. et al.* // *J. X-Ray Sci. Technol.* 1995. V. 5. P. 65. doi 10.3233/XST-1995-5106
40. *Yakunin S.N., Makhotkin I.A., Nikolaev K.V., van de Kruijs R.W.E. et al.* // *Opt. Express*. 2014. V. 22(17). P. 20076. doi 10.1364/OE.22.020076

41. Kozhevnikov I.V. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2003. V. 508. P. 519. doi 10.1016/S0168-9002(03)01512-2
42. Chkhalo N.I., Gusev S.A., Drozdov M.N., Kluev E.B. et al. // Proceed. SPIE. 2010. V. 7521. P. 752105. doi 10.1117/12.854728
43. Drozdov M.N., Drozdov Y.N., Barysheva M.M., Polkovnikov V.N. et al. // J. Surf. Invest.: X-ray, Synchrotron Neutron Tech. 2010. V. 4. P. 807.
44. Drozdov M.N., Drozdov Y.N., Chkhalo N.I., Polkovnikov V.N. et al. // Thin Solid Films. 2015. V. 577. P. 11. doi 10.1016/j.tsf.2015.01.025
45. Andreev S.S., Gaponov S.V., Gusev S.A., Haidl M.N. et al. // Thin Solid Films. 2002. V. 415. P. 123. doi 10.1016/S0040-6090(02)00536-9
46. Андреев С.С., Барышева М.М., Чхало Н.И., Гусев С.А. и др. // Журн. техн. физики. 2010. Т. 80. № 8. С. 93.
47. Renner O., Kopecky M., Krousky E., Schafers F. et al. // Rev. Scientific Instrum. 1992. V. 63. № 1. P. 1478. doi 10.1063/1.1143047
48. Montcalm C., Bajt S., Mirkarimi P., Spiller E. et al. // Proceed. SPIE. 1998. V. 3331. P. 42. doi 10.1117/12.309600
49. Chkhalo N.I., Salashchenko N.N. // AIP Advances. 2013. V. 3. Iss. 8. P. 082130. doi 10.1063/1.4820354
50. Pirozhkov A.S., Kando M., Esirkepov T.Z. et al. // Phys. Rev. Lett. 2012. V. 108. P. 135004. doi 10.1103/PhysRevLett.108.135004
51. Пирожков А.С., Рагозин Е.Н. // УФН. 2015. Т. 185. С. 1203. doi 10.3367/UFNr.0185.201511e.1203
52. Андреев С.С., Зуев С.Ю., Клюенков Е.Б., Лопатин А.Я. и др. // Поверхн. Рентген. синхротр. и нейтрон. исслед. 2003. № 2. С. 8.
53. Bibishkin M.S., Chkhalo N.I., Gusev S.A., Kluev E.B. et al. // Proceed. SPIE. 2008. V. 7025. P. 702502. doi 10.1117/12.802347
54. Chkhalo N.I., Drozdov M.N., Kluev E.B., Lopatin A.Ya. et al. // J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS. 2012. V. 11. P. 021115. doi 10.1117/1.JMM.11.2.021115
55. Zhitnik I., Kuzin S., Afanas'ev A., Bugaenko O. et al. // Adv. Space Res. 2003. V. 32. № 4. P. 473. doi 10.1016/S0273-1177(03)00351-X
56. Kuzin S.V., Zhitnik I.A., Shestov S.V., Bogachev S.A. et al. // Solar Syst. Res. 2011. V. 45. P. 162. doi 10.1134/S0038094611020110
57. Kobayashi K., Cirtain J., Winebarger A.R., Korreck K. et al. // Solar Phys. 2014. V. 289. P. 4393. doi 10.1007/s11207-014-0544-4
58. Chkhalo N.I., Drozdov M.N., Kluev E.B., Kuzin S.V., Lopatin A.Ya., Luchin V.I., Salashchenko N.N., Tsybin N.N., Zuev S.Yu. // Appl. Opt. 2016. V. 55. № 17. P. 4683.
59. Kuzin S.V., Bogachev S.A., Pertsov A.A., Shestov S.V. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. 2011. V. 75. P. 87.
60. Kortright J.B., Underwood J.H. // Nucl. Instrum. Methods. A. 1990. V. 291. P. 272277. doi 10.1134/S0038094611020110
61. Kimura H., Hirono T., Tamenori Y., Saitoh Y. et al. // J. Electron Spectroscopy and Related Phenomena. 2005. V. 144–147. P. 1079. doi 10.1016/j.elspec.2005.01.263
62. Schafers F., Mertin M., Abramsohn D., Gaupp A. et al. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2001. V. 467–468. Part 1. P. 349. doi 10.1016/S0168-9002(01)00322-9
63. Oraevsky V.N., Galeev A.A., Kuznetsov V.D., Zelenyi L.M. // Solar Encounter. Proceed. First Solar Orbiter Workshop. 2001. V. 493. P. 95.
64. Akhsakhalyan A.A., Akhsakhlyan A.D., Kharitonov A.I., Kluev E.B. et al. // Open Phys. 2005. V. 3. Iss. 2. P. 163. doi 10.2478/BF02475584
65. Montel M. X-Ray Microscopy and Microradiography, Amsterdam: Elsevier, 1957. 135 p.
66. Akhsakhalyan A.A., Akhsakhalyan A.D., Kharitonov A.I., Kluev E.B. et al. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2005. V. 543. Iss. 1. P. 346. doi 10.1016/j.nima.2005.01.253
67. Борн М. Основы оптики. М.: Наука, 1973.
68. Williamson D.M. // OSA Proceed. Extreme Ultraviolet Lithography. 1995. V. 23. P. 68.
69. Dinger U., Eisert F., Lasser H., Mayer M. et al. // Proceed. SPIE. 2000. V. 4146. P. 35. doi 10.1117/12.406674
70. Malacara D. Optical Shop Testing. New York: John Wiley&Sons, 1992.
71. Chkhalo N.I., Klimov A.Yu., Rogov V.V. et al. // Rev. Sci. Instrum. 2008. V. 79. P. 033107. doi 10.1063/1.2900561
72. Клюенков Е.Б., Пестов А.Е., Полковников В.Н., Раскин Д.Г. и др. // Росс. нанотехнологии. 2008. Т. 3. № 9–10. С. 116.
73. Chkhalo N.I., Kluev E.B., Pestov A.E., Polkovnikov V.N. et al. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2009. V. 603. P. 62. doi 10.1016/j.nima.2008.12.160
74. Салащенко Н.Н., Торопов М.Н., Чхало Н.И. // Изв. РАН. Сер. физ. 2010. Т. 74. С. 62.
75. Barysheva M.M., Chkhalo N.I., Pestov A.E., Salashchenko N.N. et al. Fundamentals of Picoscience. CRC Press, 2013. 595 p.
76. Мальшев И.В., Торопов М.Н., Чхало Н.И. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2015. № 7. С. 87.
77. Svechnikov M.V., Chkhalo N.I., Toropov M.N., Salashchenko N.N. // Opt. Express. 2015. V. 23. № 11. P. 14677. doi 10.1364/OE.23.014677
78. Chkhalo N.I., Malyshev I.V., Pestov A.E., Polkovnikov V.N. et al. // Appl. Opt. 2016. V. 55. № 3. P. 619. doi 10.1364/AO.55.000619
79. Blunt R. // Proceed. CEMANTECH Conf. 2006. P. 59.
80. Барышева М.М., Вайнер Ю.А., Грибков Б.А., Зорина М.В. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2011. Т. 75. № 1. С. 71.
81. Barysheva M.M., Gribkov B.A., Vainer Yu.A., Zorina M.V. et al. // Proceed. SPIE. 2011. V. 8076. P. 80760M. doi 10.1117/12.886470
82. Svechnikov M.V., Chkhalo N.I., Toropov M.N., Salashchenko N.N. et al. // Opt. Lett. 2015. V. 40(2). P. 159. doi 10.1364/OL.40.000159
83. Chkhalo N.I., Salashchenko N.N., Zorina M.V. // Rev. Sci. Instrum. 2015. V. 86. P. 016102. doi 10.1063/1.4905336

84. Барышева М.М., Вайнер Ю.А., Грибков Б.А., Зорина М.В. и др. // ЖТФ. 2013. Т. 83. № 9. С. 134.
85. Chkhalo N.I., Churin S.A., Pestov A.E., Salashchenko N.N. et al. // Opt. Express. 2014. V. 22. Iss. 17. P. 20094. doi 10.1364/OE.22.020094
86. Вайнер Ю.А., Зорина М.В., Пестов А.Е., Салащенко Н.Н. и др. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2015. № 8. С. 5.
87. Забродин И.Г., Закалов Б.А., Каськов И.А., Пестов А.Е. и др. // Поверхность. Рентген, синхротр и нейтрон. исслед. 2013. № 9. С. 109. doi 10.1134/S1027451013040216
88. Вайнер Ю.А., Зорина М.В., Пестов А.Е., Салащенко Н.Н., Чхало Н.И. // Изв. РАН. Сер. физ. 2014. Т. 78. № 1. С. 90.
89. Зорина М.В., Нефедов И.М., Пестов А.Е., Салащенко Н.Н. и др. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2015. № 8. С. 9.
90. Chkhalo N.I., Churin S.A., Mikhaylenko M.S., Pestov A.E. et al. // Appl. Opt. 2016. V. 55. № 6. P. 1249. doi 10.1364/AO.55.001249
91. Berglund M., Rymell L., Peuker M., Wilhein T., Hertz H.M. // J. Microscopy. 2000. V. 197. № 3. P. 268. doi 10.1046/j.1365-2818.2000.00675.x
92. Brewer C.A., Brizuela F., Wachulak P., Martz D.H. et al. // Opt. Lett. 2008. V. 33. P. 518. doi 10.1364/OL.33.000518
93. Vaschenko G., Brewer C., Brizuela F., Wang Y. et al. // Opt. Lett. 2006. V. 31. № 9. P. 1214. doi 10.1364/OL.31.001214
94. Kim K.W., Kwon Y., Nam K.Y., Lim J.H. et al. // Physics in Medicine and Biology. 2006. V. 51. P. N99. doi 10.1088/0031-9155/51/6/N01
95. Chkhalo N.I., Barysheva M.M., Pestov A.E., Salashchenko N.N. et al. // Proceed. SPIE. 2011. V. 8076. P. 80760P. doi 10.1117/12.886479
96. Artioukov I.A., Vinogradov A.V., Asadchikov V.E., Kasyanov Y.S. et al. // Opt. Lett. 1995. V. 20. P. 2451. doi 10.1364/OL.20.002451
97. Barkusky F., Peth C., Mann K., Feigl T., Kaiser N. // Rev. Sci. Instrum. 2005. V. 76. P. 105102. doi 10.1063/1.2072147
98. Chkhalo N.I., Pestov A.E., Salashchenko N.N., Sherbakov A.V. et al. // Rev. Sci. Instrum. 2015. V. 86. P. 063701. doi 10.1063/1.4921849
99. Нечай А.Н., Пестов А.Е., Полковников В.Н., Салащенко Н.Н., Торопов М.Н., Чхало Н.И., Цыбин Н.Н., Шербаков А.В. // Квантовая электроника. 2016. Т. 46. № 4. С. 347.
100. Wagner Ch., Harned N. // Nature Photon. 2010. V. 4. P. 24. doi 10.1038/nphoton.2009.251
101. Водопьянов А.В., Голубев С.В., Мансфелд Д.А., Николаев А.Г. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2008. Т. 88. № 2. С. 103. doi 10.1134/S0021364008140051
102. Chkhalo N.I., Golubev S.V., Mansfeld D., Salashchenko N.N. et al. // J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS. 2012. V. 11. P. 021123. doi 10.1117/1.JMM.11.2.021123
103. Салащенко Н.Н., Чхало Н.И. // Вестн. Росс. акад. наук. 2008. Т. 78. № 5. С. 13.
104. Patent WO 10091907 A1. Multilayer mirror and lithographic apparatus / Glushkov D., Banine V.Y. Sjaemac-nok L.A., Salashchenko N.N. et al. 2010.
105. Волгунов Д.Г., Забродин И.Г., Закалов А.Б., Зуев С.Ю. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2011. Т. 75. № 1. С. 54.
106. Булгакова С.А., Джонс М.М., Пестов А.Е., Торопов М.Н. и др. // Микроэлектроника. 2013. № 3. С. 206.
107. Chkhalo N.I., Fedorchenko M.V., Kovalenko N.V., Kruglyakov E.P. et al. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 1995. V. 359. P. 121. doi 10.1016/0168-9002(94)01633-X
108. Гайкович П.К., Полковников В.Н., Салащенко Н.Н., Чхало Н.И. и др. // Квантовая электроника. 2016. Т. 46. № 5. С. 420.
109. Saris F.W., van der Weg W.F., Tawara H., Laubert R. // Phys. Rev. Lett. 1972. V. 28. P. 717. doi 10.1103/PhysRevLett.28.717
110. Toyoda N., Matsuo J., Yamada I. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. 2004. V. 216. P. 379. doi 10.1016/j.nimb.2003.11.064
111. Yamada I., Matsuo J., Toyoda N., Aoki T. et al. // AIP Conf. Proceed. 1997. V. 416. P. 310. doi 10.1063/1.54519

Current Status and Prospects for Development of Multilayer X-Ray Optics in IPM RAS

A. D. Akhsakhalyan, E. B. Klunov, 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

A real opportunity to use traditional optical methods in the soft X-Ray and extreme ultraviolet ranges have appeared due to latest successes in technology of multilayer mirror deposition and manufacturing of mirror super-smooth and high-accuracy substrates. This opportunity opens new perspectives for substance nanodiagnosics, micro- and nanoelectronics, microbiology, solar astronomy and other applications. Main branches of multilayer X-Ray optics developed in IPM RAS and its applications in science and technology are considered. Main problems of manufacturing of multilayer interference structures for the soft X-Ray and extreme ultraviolet ranges are discussed. Main results obtained in each branch in recent years are presented. Prospects for development are discussed.