

На правах рукописи

Зуев Сергей Юрьевич

**МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ
МНОГОСЛОЙНОЙ РЕНТГЕНОВСКОЙ ОПТИКИ
В МЯГКОМ РЕНТГЕНОВСКОМ
И ВАКУУМНОМ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОМ ДИАПАЗОНАХ**

01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород
2012

Работа выполнена в отделе многослойной рентгеновской оптики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики микроструктур Российской академии наук (ИФМ РАН).

Научный руководитель: член – корреспондент РАН,
доктор физико-математических наук
Салашенко Николай Николаевич
ИФМРАН, г. Нижний Новгород

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Дроздов Юрий Николаевич
ИФМРАН, г. Нижний Новгород

доктор физико-математических наук
Шевелько Александр Петрович
ФИРАН, г. Москва

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт проблем
технологии микроэлектроники и
особочистых материалов РАН

Защита состоится « **13** » *декабря* 2012г. в **14:00** часов на заседании диссертационного совета Д 002.098.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Института физики микроструктур РАН по адресу: 607680, ул. Академическая, д. 7, д. Афонино, Нижегородская обл., Кстовский район, Россия

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института физики микроструктур РАН.

Автореферат разослан « **12** » *ноября* 2012 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук,
профессор



К.П. Гайкович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Диссертация посвящена разработке методов и аппаратуры для исследований оптических свойств многослойных структур с произвольной формой поверхности (плоские, вогнутые, выпуклые), дифракционных решеток, фильтров и других объектов в диапазоне мягкого рентгеновского (МР), экстремального ультрафиолетового (ЭУФ) и вакуумного ультрафиолетового (ВУФ) излучений.

С 80-х годов XX века, в связи с развитием технологий обработки оптических поверхностей и вакуумного осаждения тонких пленок, началось интенсивное развитие нового направления в оптике МР диапазона и ближайших к нему областей спектра - оптики многослойных рентгеновских зеркал (МРЗ) [1,2,3]. С совершенствованием технологии изготовления многослойных структур (МС) появились МС нормального падения, что привело к разработке изображающих оптических схем и инструментов с зеркалами нормального падения не только в диапазоне МР, но и в ближайших к нему ЭУФ и ВУФ диапазонах [4,5]. Эффективность применения МРЗ в научных и прикладных исследованиях напрямую зависит от их физических свойств, прежде всего, от отражательных характеристик, определяемых микроструктурой пленок в атомарных масштабах и являющихся сложной функцией толщин пленок, от физико-химических и геометрических свойств поверхности подложки а также от условий роста пленок [6].

Технологический процесс изготовления МС в обязательном порядке сопровождается контрольными измерениями, и при изготовлении плоских зеркал может использоваться исследовательское оборудование для жесткого рентгеновского диапазона 0,01-0,025нм - серийно выпускаемые промышленностью дифрактометры. Окончательные исследования, в силу неполноты данных получаемых от измерений в жестком рентгене, в обязательном порядке осуществляются на специальной аппаратуре - рефлектометрах с рабочим диапазоном излучений, соответствующим рабочей длине волны изготавливаемой МС. С увеличением сложности рентгенооптических элементов модернизировалась и создавалась новая исследовательская аппаратура в рабочих диапазонах изготавливаемых структур. Появление научного интереса к многослойным структурам, первоначально на вогнутых, а впоследствии и на выпуклых поверхностях, обусловило появление задачи создания оборудования, позволяющего обеспечить как сопровождение технологии создания МС на неплоских поверхностях, так и выходной контроль этих оптических элементов. Ввиду того, что интенсивно росло разнообразие размеров и форм рентгенооптических элементов, возникла задача создания универсальной аппаратуры, позволяющей локально по поверхности исследовать не только МС на поверхностях произвольной формы, но и другие оптические элементы МР и ЭУФ диапазона. В последнее время особенно интенсивно развернулись ра-

боты по проекционной ЭУФ литографии, успех которых во многом обеспечивается созданием комплекса осветительных и проекционных элементов изображающей оптики сверхвысокого качества, использующих МС технологию на длину волны 13,5нм. Это новейшее направление промышленного производства интегральных радиоэлектронных компонентов постепенно переходит из области научных интересов в область коммерческих. Все рентгенооптические элементы по программе создания отечественной литографии на 13,5нм необходимо исследовать в процессе создания и контролировать по выходным параметрам.

Степень разработанности темы диссертации

Основные методические приемы и предшествующая аппаратура для исследований в этом диапазоне разрабатывались в два этапа: первый проходил в 30-х годах XX века, в период интенсивного изучения рентгеновских лучей (возможности исследователей сильно ограничивались возможностями вакуумной техники) и второй период с 60-х годов XX века, когда сформировались прообразы современного исследовательского оборудования в диапазоне МР, ЭУФ и ВУФ излучений. Поэтому большая часть работы посвящена развитию имевшихся и разработке новых методов решения поставленной задачи в диапазоне МР, ЭУФ и ВУФ излучений.

К настоящему времени за рубежом созданы и эксплуатируются несколько лабораторных и стационарных (на станциях синхротронного излучения) рефлектометров [7,8]. Лидирующим по своим характеристикам в мире является стационарный рефлектометр на станции СИ “BESSY-II”, (Германия, Физико-Технический департамент стандартов), позволяющий исследовать образцы большого диаметра, по всей поверхности и с высокой точностью. Синхротронные источники остаются уникальным оборудованием и не могут быть использованы в большинстве лабораторий.

Цель и задачи

Цель диссертационной работы является создание методов и лабораторного оборудования для рефлектометрии оптических элементов с поверхностью произвольной формы в МР и ВУФ диапазонах излучения.

Для достижения этой цели решались следующие задачи:

1. Создание универсального вакуумного гониометра с 5-ю степенями свободы исследуемого объекта и 3-мя степенями свободы приемника излучения, обеспечивающего возможность измерений локальных коэффициентов отражения и рассеяния от образцов с произвольной формой поверхности диаметром до 300 мм и числовой апертурой не более 0,5.
2. Создание источника мягкого рентгеновского излучения, приспособленного для эффективной работы в этом диапазоне излучений.

3. Развитие принципов построения рефлектометра и оптимизация его составных частей для решения задач рефлектометрии объектов с произвольной формой поверхности.

4. Создание лабораторных рефлектометров, перекрывающих совместно рабочий спектральный диапазон 0,6-200 нм

5. Разработка методик измерения угловых и спектральных характеристик (отражения/пропускания/рассеяния) элементов многослойной оптики с произвольной формой поверхности и градиентным распределением периода.

Научная новизна

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. На момент создания, разработанный универсальный гониометр по основным техническим характеристикам не имел аналогов в ведущих российских и зарубежных лабораториях.

2. Разработанные лабораторные рефлектометры, перекрывают спектральный диапазон 0,6-200 нм, и по ширине общего рабочего диапазона, и спектральной селективности превосходят лабораторные рефлектометры ведущих мировых центров многослойной рентгеновской оптики.

3. Разработана рентгеновская трубка с интегрированным источником ионов для очистки антикатада от загрязнений и оптимизированная для работы в диапазоне мягкого рентгеновского излучения 0,6-25,0 нм.

Практическая значимость работы

- Разработанные методики и разработанная аппаратура обеспечили измерительной базой технологический процесс изготовления элементов многослойной изображающей рентгеновской оптики нормального падения для МР и ЭУФ диапазонов в ИФМ РАН, занимающим ведущие позиции в мире в этом направлении.

- Разработанные методики и аппаратура обеспечили метрологию научной аппаратуры, разрабатываемой по программам КОРОНАС-И, КОРОНАС-Ф и КОРОНАС-ФОТОН отечественных и международных программ исследования Солнечной короны.

- Разработанные методики и аппаратура обеспечили необходимыми измерениями работы по созданию оптики для проекционной ЭУФ литографии, проводимые в ИФМ РАН и ряде зарубежных исследовательских центров.

- Разработанные в диссертации методики и аппаратура готовы для применений в промышленности.

Методология и методы исследования

Предметом исследования диссертации являются разработка приборов и методов для исследования оптических свойств объектов рентгеновской опти-

ки: МС с произвольной формой поверхности, плоских/вогнутых/выпуклых дифракционных решеток, фильтров и др., характеризующих энергетические соотношения между компонентами излучения МР, ЭУФ и ВУФ диапазонов при взаимодействии излучения с поверхностью и объемом исследуемых объектов. Основные методики исследования объектов подобного типа и теоретическое обоснование их результатов были разработаны в оптике видимого диапазона излучений [9]. Диапазон излучений, в котором исследуется предмет настоящей диссертации имеет свои специфические особенности, которые делают неприемлемым прямое применение методов оптики видимого диапазона для решения поставленной задачи. В равной степени неприемлемым оказывается в этом диапазоне прямое заимствование методических разработок, сформировавшихся в диапазоне жесткого рентгеновского излучения [6,10]. Рабочий диапазон исследований, занимающий почти два с половиной порядка по длине волны, отличается специфичностью применяемой аппаратуры (вся аппаратура вакуумная), разработке которой посвящена значительная часть диссертации.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Разработан комплекс методик позволяющий измерять угловые и спектральные характеристики (отражения/ пропускания/ рассеяния) элементов многослойной оптики с произвольной формой поверхности и градиентным распределением периода с абсолютной погрешностью измерения пиковых значений характеристик не превышающей 2% с доверительной вероятностью 0,98.

2. Создан универсальный вакуумный гониометр для исследования многослойных зеркал с произвольной формой поверхности, обеспечивающий необходимые манипуляции с исследуемым объектом (5 степеней свободы): в экваториальной и меридиональной плоскости с точностью по углам $0,005^\circ$, позиционирование объекта относительно падающего пучка с точностью не хуже 0,1 мм, позиционирование локального исследуемого элемента поверхности на ось гониометра с точностью не хуже 0,025 мм, и манипуляции приемником излучения (3 степени свободы): в экваториальной и меридиональной плоскости с точностью по углам $0,01^\circ$, позиционирование относительно оси гониометра с точностью 1 мм.

3. Создан рефлектометр, обеспечивающий исследования коэффициентов отражения /прохождения и рассеяния для объектов с произвольной формой поверхности диаметром до 300 мм и числовой апертурой не более 0,5 в диапазоне 0,6-8,0 нм с погрешностью отсчета длины волны $\pm 0,01$ нм и абсолютной погрешностью измерения пиковых значений коэффициентов отражения многослойных зеркал не превышающей $\pm 2\%$ (для доверительной вероятности 0,98) на длине волны 6,7 нм.

4. Создан рефлектометр, обеспечивающий исследования коэффициентов отражения /прохождения и рассеяния образцов с произвольной формой

поверхности диаметром до 250 мм и числовой апертурой не более 0,5 в спектральном диапазоне от 4,0 до 200 нм с погрешностью отсчета длины волны $\pm 0,03$ нм и погрешностью измерения абсолютных значений пиковых коэффициентов отражения многослойных зеркал не превышающей $\pm 2\%$ (для достоверной вероятности 0,98) на длине волны 13,5 нм.

Личный вклад автора

Автор сформулировал и решил поставленную перед ним задачу создания измерительных методов и оборудования для исследования оптических характеристик отражения/рассеяния и прохождения в МР и ВУФ диапазонах излучений для образцов с произвольной формой поверхности.

Им лично были произведены исследования и макетные испытания, на основании которых был разработан и аттестован универсальный вакуумный гониометр для исследования многослойных зеркал с произвольной формой поверхности [A4], [A5], [A6], [A10].

При определяющем участии автора разработан рефлектометр для исследования оптических характеристик (коэффициентов отражения /прохождения и рассеяния) объектов с произвольной формой поверхности в диапазоне 0,6-8,0 нм [A18], [A23], [A24].

При определяющем участии автора в составе коллектива разработан широкодиапазонный рефлектометр для исследования оптических характеристик в спектральном диапазоне от 4,0 до 200 нм [A15], [A16], A17], [A21], [A27], [A28], [A29], [A31].

С использованием разработанных рефлектометров и методик автором лично производились исследования: структур с малыми периодами [A7], [A8], [A9], стрессов в структурах [A13], оптимизации изготовления МС [A12], [A14], [A22], [A30], качества поверхности [A19], [A20] и исследование связанные с рядом задач возникающих при создании проекционной ЭУФ литографии [A10], [A26], [A32-A36].

Степень достоверности и апробация работы

Значительная часть диссертации посвящена исследованию достоверности производимых измерений с применением разработанных методов и аппаратуры. Практическое сравнение результатов измерений произведенных на разработанном автором оборудовании и на оборудовании синхротронного центра "BESSY-II" (РТВ, Германия) показало высокое совпадение результатов измерений как спектрально-угловых, так и энергетических характеристик исследуемых объектов

Результаты, полученные в диссертации, докладывались на российских и международных конференциях: Международного симпозиума "Коротковолновые лазеры и их применение", (1990, Самарканд), 5-Всесоюзное совещание по диагностике высокотемпературной плазмы. (1990, Минск), XV Intern. confer. on X-Ray and Inner-Spell Processes. (1990, USA), Europhysics Industrial

Workshop EIW-9 “Nanometer-Scale methods in X-ray Technology”, (1993, Netherlands), International Conference “Interference phenomena in X-ray scattering”, (1995, Russia), Национальной конференции по применению рентгеновского, синхротронного излучений, нейтронов и электронов для исследования материалов. (1997, 2003, Москва), Всероссийское Совещание «Рентгеновская оптика» (1998, 1999, 2000, 2002, 2003, 2004, Нижний Новгород), Российской конференции Микро- и нанoeлектроника 98, (1999), Российской Конференции по «Использованию Синхротронного Излучения» (2000, Новосибирск), , International Conference “Micro- and nanoelectronics” (2003, 2005, 2007, Звенигород), International Workshop «SEMATECH EUV Source» (2003, Santa Clara, Ca, США), International «Extreme Ultraviolet» (2003 Antwerp, Belgium), International Conference on «Physics of X-Ray Multilayer Structures» (2004 Sapporo, Japan), Рабочее совещание по Программе отделения физических наук РАН «Новые материалы и структуры» (2004 Нижний Новгород, 2007 Черногоровка), Симпозиум «Нанофизика и нанoeлектроника» (2005, 2006, 2008, 2009, 2010, 2011 Нижний Новгород), XVII International Synchrotron Radiation Conference SR-2008, (2008, Novosibirsk, Russia), Совещание «Рентгеновская оптика» (2008 Черногоровка).

Публикации

Основное содержание диссертации отражено в 76 работах, из них 36 - статьи в рецензируемых научных журналах и 40 докладов в трудах симпозиумов, конференций и семинаров.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и приложения. Она содержит 273 страницы, включая 104 рисунка и 8 таблиц. Список цитированной литературы насчитывает 88 наименований.

Во введении оценивается актуальность темы, научная новизна, практическая значимость работы, сформулирована цель диссертационной работы и положения, выносимые на защиту.

В первой главе дается обзор особенностей спектрального диапазона МР и ЭУФ излучения и сформировавшихся методик рефлектометрии плоских объектов рентгеновской оптики: МРЗ, плоских дифракционных решеток, однородных пленок на просвет. Проведенный в работе анализ применимости методик для решения поставленной задачи рефлектометрии ИМС с произвольной формой поверхности позволил выбрать методику с измерением интегральной по пространству интенсивности. Эта методика обеспечивает наиболее достоверные исследования оптических коэффициентов отражения/прохождения элементов оптики МР и ЭУФ диапазонов, искажающих не-

плоской рабочей поверхностью геометрию падающего пучка в отраженной/прошедшей компонентах излучения. Предложенная методика измерений на неплоских поверхностях представляется схемой измерения с узким падающим квазипараллельным пучком и равномерным по чувствительности входным окном приемника подобным сечению пучка по форме.

В этой схеме изменение геометрических размеров пучка на искривленной поверхности исследуемого объекта не оказывает влияния на результат измерения соотношения интенсивностей исследуемой компоненты излучения и падающего пучка, если только размеры сечения пучка на входе приемника не превосходят область равномерности входного окна *рис. 1*. Чем больше соотношение подобия N между размерами входного окна приемника B_d и H_d и соответствующими размерами сечения падающего на образец пучка b и h

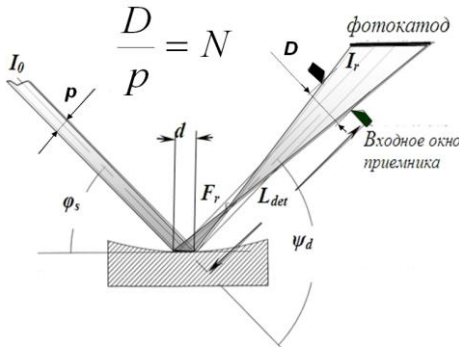


Рис.1. Пространственно интегральный метод исследования отражения от многослойных структур с произвольной формой поверхности.

регулируемого входным окном приемника. С уменьшением размеров пучка, закономерно падает его интенсивность и увеличивается статистическая погрешность измерения, что приводит к поиску оптимального размера пучка. Найденные автором в работе соотношения определяющие оптимальный размер сечения падающего пучка и его расходимость в отраженном или прошедшем излучении связаны с локальным радиусом кривизны поверхности в исследуемой ее точке и расстоянием от следа пучка на поверхности до источника излучения L_{det} :

$$\begin{aligned} L_{det} &\leq (N+1) \cdot F \text{ для вогнутой поверхности,} \\ L_{det} &\leq (N-1) \cdot F \text{ для выпуклой поверхности,} \end{aligned} \quad (2)$$

где F - фокус локально исследуемого участка поверхности. Фокусное расстояние F локального исследуемого участка поверхности связано: с углом падения φ' , отсчитываемым от нормали, локальным радиусом кривизны поверхности r и размером сечения пучка b в плоскости падения луча на исследуемую поверхность выражением [6]

$$F = \frac{b \sqrt{1 + \tan^2 \varphi' \tan^4 2\alpha}}{2 \tan 2\alpha} \quad (3)$$

где

$$\tan 2\alpha = \frac{\sqrt{4 \cdot (r/b)^2 \cdot \cos^2 \varphi' - 1}}{2 \cdot (r/b)^2 \cdot \cos^2 \varphi' - 1} \quad (4)$$

Соотношения (2) – это основные методические требования. В главе рассмотрены и дополнительные ограничения метода, связанные с экранированием падающего или отраженного луча исследуемой поверхностью, а также ограничения, возникающие при исследовании высокоселективных структур на искривленных поверхностях из-за того, что в пределах следа зондирующего луча условия его интерференции зависят не только от расходимости луча, но и от кривизны исследуемой поверхности.

Для исследования характеристик рассеяния многослойных структур с поверхностью произвольной формы в работе предлагается метод пространственных растров, с помощью которого (с узким окном на приемнике излучения) исследуются угловые индикатрисы падающего и рассеянно-отраженного от зеркала или рассеяно-проходящего тонкий фильтр излучения. Метод представляет собой измерение с последующей обработкой одномерных и двумерных сканов пространственных индикатрис исходного пучка и исследуемой его компоненты. Сканирование пространственной индикатрисы осуществляется пошаговым перемещением приемника излучения с пространственной величиной шага, равной размеру входного окна приемника излучения. Получаемые этим методом характеристики рассеяния характеризуют пространственные изменения излучения при отражении/прохождении излучения, а площади под кривыми рассеяния характеризуют энергетические соотношения компонент излучения: при этом общий объем измерений возрастает примерно в квадратичном размере.

Основные требования, которые предъявляются к оборудованию при применении растрового метода – это достаточно высокая интенсивность падающего излучения для достоверной регистрации исследуемой компоненты излучения с использованием узкой угловой апертурой приемника. При этом равномерность приемной характеристики по апертуре приемника не так важна, как стабильность его характеристик во времени.

Частным применением растрового метода исследований оптических характеристик является исследование многослойных структур на поверхностях с малыми радиусами кривизны (выпуклых и вогнутых), когда отраженное от поверхности излучение расходится или рассеивается в пространство, не падая при этом целиком во входное окно приемника.

По результатам проведенного анализа в работе сформулированы основные требования к лабораторному оборудованию, предназначенному для практической реализации этих методических разработок, которые сводятся к показанной на *рис. 2* кинематической схеме инструмента для исследования оптических характеристик отражения/прохождения и рассеяния от многослойных структур с поверхностью произвольной формы, используя предлагаемые методики. Образец и детектор изменяют свое взаимное расположение относи-

тельно падающего луча в экваториальной плоскости гониометра (в ней лежит падающий и отраженный пучки и происходит отсчет углов падения φ и отражения ($\psi - \varphi$)). Для выбора локальной точки исследования образец вращается вокруг выбранной оси симметрии поверхности ω и смещается по радиусу ρ в меридиональной плоскости. При исследовании многослойных структур на выпуклых/вогнутых поверхностях образец наклоняется в меридиональной плоскости по углу θ (для установки локальной нормали к исследуемому элементу поверхности в экваториальную плоскость) и смещается в направлении этой нормали по координате h (для установки исследуемого элемента поверхности на главную ось гониометра). Для адаптации схемы измерений под

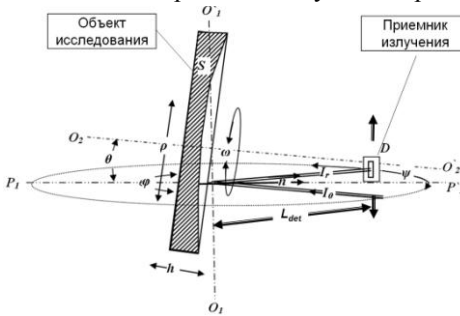


Рис. 2. Схема необходимых манипуляций образцом и приемником излучения, обеспечивающая выполнение достоверных исследований коэффициентов отражения/прохождения и рассеяния многослойных структур локально по поверхности на поверхностях произвольной формы.

образцы с выпуклой/вогнутой поверхностью с локальным фокусным расстоянием F рис. 1 и выражение (2) приемник может смещаться в направлении к главной оси и от нее L_{det} . Для юстировки гониометра в целом и реализации двумерных сканов приемник смещается в меридиональной плоскости выше или ниже экваториальной плоскости по координате Z_{det} .

В главе приводятся методики, расширяющие возможности применения пространственно-интегрального метода для исследований коэффициентов рассеяния плоских и неплоских отражательных дифракционных решеток и коэффициентов прохождения частично прозрачных объектов на просвет, а также рассмотрены методические особенности измерений с монитором угловых и спектральных характеристик.

Результаты, полученные в первой главе:

1. Разработаны методики исследования оптических характеристик многослойных структур на поверхностях произвольной формы.
2. Разработаны требования к лабораторному оборудованию для исследования многослойных структур на поверхностях произвольной формы

Вторая глава посвящена разработанному автором оборудованию для рефлектометрии в МР и ЭУФ диапазонах. В начале дано описание лабораторного оборудования, состоящего из отечественного монохроматора РСМ500 (разработанного в ЛГУ А.П. Лукирским [11] в 1965 г.) и гониометрической вакуумной камеры-приставки (разработанной в ИПФ АН СССР

И.Г.Забродиным в 1986 г.) предназначенных для рефлектометрии многослойных структур на плоских поверхностях размером не более 60x60x10 мм. Одним из главных результатов работы является разработка на основе проведенных автором исследований и макетных испытаний и аттестация универсального вакуумного гониометра *рис. 3* для оптических измерений коэффициентов отражения/прохождения и рассеяния для многослойных структур с произвольной формой поверхности.

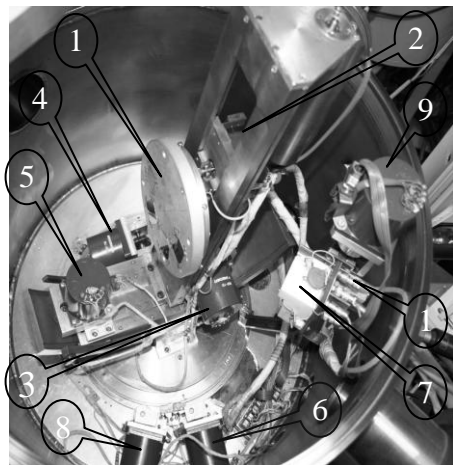


Рис. 3. Универсальный вакуумный гониометр 1 - столик образцов, 2 - ШД вращения столика, 3 - ШД сдвига столика в меридиональной плоскости, 4 - ШД наклона столика в меридиональной плоскости, 5 - ШД установки столика на ось вращения, 6 - ШД поворота столика в экваториальной плоскости, 7 - приемник излучения, 8 - ШД поворота приемника в экваториальной плоскости, 9 - ШД перемещения приемника в меридиональной плоскости, 10 - узел изменения расстояния от оси гониометра до приемника.

Разработанный инструмент обеспечил необходимые манипуляции с исследуемым объектом (5 степеней свободы): в экваториальной и меридиональной плоскости с точностью по углам $\pm 0,005^\circ$, позиционирование объекта относительно падающего луча с точностью не хуже $\pm 0,1$ мм, позиционирование исследуемого локального элемента поверхности на ось гониометра с точностью не хуже $\pm 0,025$ мм. Манипуляции приемником излучения обеспечиваются 3-мя степенями свободы: в экваториальной и меридиональной плоскости с точностью по углам $\pm 0,01^\circ$, установка дистанции приемник - ось гониометра с точностью ± 1 мм.

В главе дано описание разработанного и собранного рефлектометра МР и ЭУФ диапазона 0,6-8,0 нм на основе описанного выше универсального вакуумного гониометра.

Приведена оптическая схема и описание разработанного рефлектометра МР излучений с расширенным спектральным диапазоном в область ВУФ излучений 4,0-200 нм *рис. 4*.

Описаны основные изменения, внесенные автором в схемы и конструкции составных частей рефлектометра, обеспечившие его оптимизацию для работы во всем рабочем спектральном диапазоне. В конце главы приведены примеры применения разработанных авторских методик и аппаратуры для рефлекто-

метрии конкретных объектов исследования из опыта осуществления автором исследовательских работ.

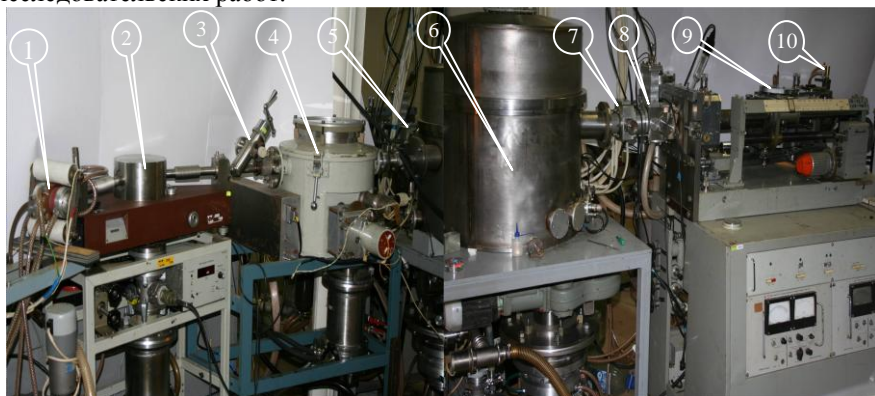


Рис. 4. Объединенный лабораторный рефлектометр для измерений в диапазоне МР и ВУФ: 1 - газоразрядный источник, 2 - монохроматор LHT30, 3,5,7 - разделительный шибер, 4 - промежуточная камера, 6 - камера универсального гониометра, 8- камера монитора, 9 - монохроматор РСМ500, 10 - рентгеновская трубка.

Результаты, полученные во второй главе:

1. *создан универсальный гониометр, обеспечивший необходимые манипуляции с образцом и приемником в вакууме при исследованиях многослойных структур с поверхностью произвольной формы и других типов объектов,*
2. *модернизирован монохроматор РСМ500 и разработаны оптимальные конструкции составных частей рефлектометра: рентгеновская трубка, монитор, приемник излучения,*
3. *созданы лабораторные рефлектометры для исследований и сертификации многослойных структур в диапазонах 0,6-8 нм и 4,0 – 200 нм.*

В третьей главе рассматриваются физические процессы и функциональные схемы, определяющие эффективность составных частей и рефлектометра в целом. Специфика исследований в МР и ЭУФ диапазонах излучений состоит в сильном поглощении излучений этих длин волн как в атмосферном воздухе при нормальных условиях, так и в тонких пленках различных веществ и материалов. В связи с этим, в аппаратуре, работающей с МР и ЭУФ излучением, все элементы оптической схемы имеют общий вакуумный объем, качество вакуума в котором заметно сказывается на работе РТ и приемников излучения. Глава открывается исследованием физических механизмов, определяющих эффективность работы рентгеновской трубки в МР диапазоне и формированием требований к рентгеновским трубкам этого диапазона, которые заметно отличаются от требований для трубок, работающих в жестком диапазоне [10,12].

Полученные в работе результаты расчета диаграммы направленности возбужденного в антикатоде трубки излучения МР диапазона и выходящего в вакуум под углом θ к поверхности антикатада показали в рассматриваемой модели возбуждения излучения пучком электронов в материале антикатада, покрытого пленкой поверхностных загрязнений толщиной d , что на коротковолновой границе МР диапазона условия возбуждения рентгеновских излучений и выхода их через поверхность антикатада в вакуум близки к общепринятым представлениям, в то время как на длинноволновой границе мягкого рентгеновского диапазона диаграмма направленности излучения антикатада заметно спадает к углам близким к скольжению. Нарастание пленки углеродных и вольфрамовых загрязнений в значительной степени усиливает этот эффект.

Для антикатодов, материал которых активен к кислороду, дополнительной проблемой является рост оксидной пленки на антикатаде. С учетом проведенных исследований для решения этих проблем в диссертации была разработана рентгеновская трубка с увеличенным углом отбора излучения и интегрированным в нее источником ионов, предназначенным для очистки поверхности антикатада от загрязнений. Практика применения этого источника показала, что временная стабильность и интенсивность зондового пучка выросли в несколько раз.

Определены предельные метрологические характеристики монохроматора РСМ500, многие узлы которого были модернизированы в процессе создания рефлектометров. Было исследовано влияние спектральных aberrаций решетки на ширину спектральной полосы пропускания монохроматора в зависимости от рабочей апертуры дифракционной решетки и размера щелей. Исследована форма аппаратной функции монохроматора и ее зависимость от ширины щелей. Исследовано влияние: высоты щелей, погрешности установки копира, взаимного перекоса щелей и решетки при юстировке, смещения выходной щели монохроматора перпендикулярно его оптической оси на светосилу монохроматора и вид спектральной аппаратной характеристики монохроматора (ее ширину и форму). Выработаны рекомендации по учету влияния основных метрологических параметров монохроматора на результат измерения и по выбору оптимального соотношения светосилы и ширины спектральной полосы монохроматора при измерениях.

Оптимизирована методика измерения с монитором в оптических схемах рефлектометров, применяющих монитор с отбором мощности падающего излучения и предложена оптимальная конструкция монитора для непрерывных источников излучения. Оптимальное соотношение M деления пучка на зондовый и регистрируемый монитором, минимизирующее статистическую погрешность измерения выражается в виде

$$M = \sqrt{\frac{R+1}{2 \cdot R}}, \quad (0 < R \leq 1) \quad (5)$$

где R – значение измеряемой величины (коэффициент отражения/пропускания/рассеяния). Полученное соотношение имеет методическую значимость и не зависит от конструкции монитора.

Предложена схема приемника излучения, отвечающая всем требованиям методики измерений пространственно интегральным методом, обеспечивающая максимально возможный размер входного окна приемника излучения с равномерной чувствительностью и высокой эффективностью использующего в своей конструкции фотокатод с электронным умножителем ВЭУ-6 [13].

В части главы, посвященной оборудованию ВУФ диапазона, приводится схема разработанного газоразрядного источника, даются авторские рекомендации по стабилизации интенсивности возбуждаемого в нем излучения и рассчитываются предельные метрологические характеристики монохроматора ЛНТ30, обеспечивающего выделение линии необходимой длины волны из линейчатого спектра возбуждения ионов разной зарядности.

Приведены схемы и расчет формирователей пространственных параметров пучка щелевых коллиматоров и зеркальных коллекторов/коллиматоров, рассмотрены достоинства и недостатки их применения в конкретных оптических схемах.

Развита методика юстировки монохроматора РСМ500 и разработаны методики юстировки универсального вакуумного гониометра и рефлектометра.

Результаты, полученные в третьей главе:

1. *оптимизирована конструкция рентгеновских трубок на диапазон МР излучения, позволившая уменьшить размер источника, повысить яркость и увеличить стабильность работы РТ;*

2. *модернизирована конструкция монохроматора РСМ500;*

3. *оптимизирована конструкция монитора и развиты методики измерений с его применением;*

4. *разработана методика юстировки рефлектометра;*

5. *оптимизированы схема и конструкция приемника излучения.*

Приложение А

В приложении А приводится полное описание программного обеспечения, обеспечивающего исследовательский процесс. Важным достижением программного алгоритма является возможность создания списка инструкций, описывающих одно или группу измерений - файла проекта измерения и его последовательного автоматического выполнения.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Созданы методики измерений угловых и спектральных характеристик (отражения/пропускания/рассеяния) элементов многослойной оптики с произвольной формой поверхности и градиентным распределением периода.
2. Создан универсальный вакуумный гониометр, обеспечивающий измерение

- локальных коэффициентов отражения и рассеяния от образцов с произвольной формой поверхности с максимальным диаметром до 300 мм и числовой апертурой не более $NA=0,5$.
3. На основе универсального гониометра, монохроматора и рентгеновской трубки создан лабораторный рефлектометр, позволяющий изучать оптические элементы в спектральной области 0,6-8 нм, не уступающий по основным техническим характеристикам аналогам, существующим в единичных экземплярах в мире.
 4. Разработан рефлектометр с расширенным спектральным диапазоном от 4,0 до 200 нм, объединяющий универсальный гониометр, монохроматор РСМ500 с источником РТ и монохроматор ЛНТ30 с газоразрядным источником.
 5. Разработана электроника и программное обеспечение, обеспечивающие оперативное управление 8-ю электрическими приводами рефлектометра и управление сбором, обработкой и хранением данных измерений, а также автоматическое исполнение пакетных заданий из встроенного списка измерений.

Цитированная литература

1. *Spiller, E.* Propagation of x rays in waveguides / *E. Spiller, A. Segmüller* // *Appl. Phys. Lett.* - 1974. - V.24. - P.60.
2. *Barbee, T.W. (Jr.)* Sputtered layered synthetic microstructures (LSM) dispersion elements / *T.W. Barbee (Jr.)* // *Low energy X-ray diagnostics: Proc. conf., Monterey, USA, 1981.* - N. Y.: Amer. Inst. Phys., 1981. - P.131-145.
3. *Gaponov, S.V.* Long wave X-ray radiation mirrors / *S.V. Gaponov, S.A. Gusev, B.M. Luskin, N.N. Salashchenko* // *Opt. Commun.* - 1981. -V.38.- P.7-11.
4. *Windt D. L.* Multilayer characterization at LPARL. / *D. L. Windt, R. C. Catura*// *Proc. SPIE, 984, 82-88 (1988)*
5. *Krumrey, M. K.* Precision soft x-ray reflectometry of curved multilayer optics / *M. K. Krumrey, P. Mueller, F.Scholze* // *Proc. SPIE.* - 1992.-V.1547.-P.136.
6. *Виноградов, А.В.* Зеркальная рентгеновская оптика / *А.В. Виноградов, И.А. Брытов, Ф.Я. Грудский, М.Т. Коган, И.В. Кожевников, В.А. Слемзина* // Л.: Машиностроение. Ленинградское отд-ние. - 1989. - 463 с.
7. *Tummler, J.* Characterization of the PTB EUV reflectometry facility for large EUVL optical components./ *J. Tummler, H. Blume, G. Brandt, J. Eden, B. Meyer, H. Scherr, F. Scholze, G. Ulm*// *ProcSPIE5037(2003)265.*
8. *Akira, Miyake* LPP-based reflectometer for characterization of EUV lithography systems/ *Akira Miyake; Takeshi Miyachi; Mitsuaki Amemiya; Takayuki Hasegawa; Nobuaki Ogushi; Takeshi Yamamoto; Fumitaro Masaki; Yutaka Watanabe.*//*ProcSPIE5037(2003)647.*
9. *Борн, М.* Основы оптики./*М. Борн, Э.Вольф*// - М.:Наука,1973,- 720с.
10. *Гинье, А.* Рентгенография кристаллов / *Под ред. Н.В. Белова* // М:Гос. изд. физ.-мат. лит-ры. - 1961. - 604 с..

11. Зимкина, Т.М. Ультратонкая рентгеновская спектроскопия / Т.М. Зимкина, В.А. Фомичев // Л.: Изд-во ЛГУ. - 1971. - 132 с.
12. Иванов, С.А. Рентгеновские трубки технического назначения./ С.А. Иванов, Г.А. Щукин//Л.: Энергоатомиздат, Лен.отд., 1989, -200 с.
13. Айнбунд, М. Р. Вторично электронные умножители открытого типа и их применение./ М. Р Айнбунд, Б.В.Поленов// – М.: Энергоиздат, 1981.-40 с.

Список авторских публикаций по теме диссертации

[A1] *Andreev, S.S.* Small d-spacing multilayer structures for the photon energy range $E > 0.3$ keV/ *S.S.Andreev, B.R.Muller, Yu.Ya.Platonov, N.I.Polushkin, N.N.Salashchenko, F.Schafers, S.I.Shinkarev, D.M.Simanovsky, S.Yu.Zuev* // Proc. SPIE, v.1800, 1991, p.195-208.

[A2] *Platonov, Yu.Ya.* Multilayer mirrors and filters for soft x-ray spectroscopy of high-temperature plasma/ *Yu.Ya.Platonov, S.V.Bobashev, N.N.Salashchenko, D.M.Simanovsky, L.A.Shmaenok, S.Yu.Zuev* // Proc.SPIE, v.2011,1994, pp.476-488.

[A3] *Salashchenko, N.N.* Normal incidence imaging multilayer X-ray mirrors with the periods of nanometer and subnanometer scale/ *N.N.Salashchenko, S.V.Gaponov, A.D.Akhsakhalyan, S.S.Andreev, Yu.Ya.Platonov, N.I.Polushkin, E.A.Shamov, S.I.Shinkarev, S.Yu.Zuev*//Proc.SPIE,v.2011,1994,p.402-412.

[A4] *Salashchenko, N.N.* Multilayer X-ray optics for synchrotron radiation/ *N.N. Salashchenko, Yu.Ya. Platonov, S.Yu. Zuev* //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A359 (1995), 162-167.

[A5] *Louis, E.* Multilayer coated reflective optics for Extreme UV lithography/ *E.Louis, H.-J.Voorma, N.B.Koster, F. Bijkerk, Yu.Ya.Platonov, S.Yu.Zuev, S.S.Andreev, E.A.Shamov, N.N.Salashchenko*// Microelectronic Engineering 27 (1995) 235-238.

[A6] *Salashchenko, N.N.* Multilayer optics for X-ray and EUV radiation/ *N.N. Salashchenko, S.S. Andreev, Yu.Ya. Platonov, E.A. Shamov, S.Yu. Zuev, A.I. Chumakov* //Поверхность, 1996, N3-4, с.21-42.

[A7] *Andreev, S.S.* Short - period x-ray multilayers/ *S.S. Andreev, A.A. Fraerman, K.A. Prokhorov, N.N.Salashchenko, E.A. Shamov, S.A. Zuev, F. Schaefers* // Proc. SPIE,v.3406, 70-79 (1998).

[A8] *Прохоров, К.А.* Малопериодные зеркала на основе Ti для диапазона "окна прозрачности воды"/ *К.А.Прохоров, С.С.Андреев, С.Ю.Зуев, Н.Н.Салащенко* //Поверхность. N1, 1999, с. 166-169.

[A9] *Шамов, Е.А.* Многослойные рентгеновские зеркала малых периодов на основе скандия и углерода для работы в диапазоне "водного окна"/ *Е.А.Шамов, Н.Н.Салащенко, С.Ю.Зуев, С.В.Митенин, Ф.Шаферс* //Поверхность, N1, 1999, с. 155-158.

[A10] *Андреев, С.С.* Исследования в области проекционной литографии экстремального ультрафиолетового диапазона в Институте Физики Микроструктур РАН/ *С. С. Андреев, С.А. Булгакова, С.В. Гапонов, С.А. Гусев, С.Ю.*

Зуев, Е.Б. Клюенков, В.И. Лучин, А.Я. Лопатин, Л.М. Мазанова, К.А. Прохоров, Е.Н. Садова, Н.Н. Салащенко, Е.А. Шамов // Поверхность, 2000, N1, с.32-41.

[A11] *Andreev, S.S. Low-energy X-ray fluorescence micro-distribution-analysis using a laser plasma X-ray source and multilayer optics/ S.S. Andreev, F. Bijkerk, H. Fledderus, N.N. Salashchenko, E.A. Shatov, L.A. Shmaenok, R. Stuik, S.Yu. Zuev // Поверхность, 2000, №1, с. 105-111.*

[A12] *Андреев, С.С. Оптимизация технологии изготовления многослойных Mo/Si зеркал/ С.С. Андреев, С.В. Гапонов, С.А. Гусев, С.Ю. Зуев, Е.Б. Клюенков, К.А. Прохоров, Н.И. Полушкин, Е.Н. Садова, Н.Н. Салащенко, Л.А. Суслов // Поверхность №1, с.66-73, 2001.*

[A13] *Andreev, S.S. Stress reduction of Mo/Si multilayer structures/ S.S. Andreev, N.N. Salashchenko, L.A. Suslov, A.N. Yablonsky, S.Yu. Zuev // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 470 (2001), 162-167.*

[A14] *Зуев, С.Ю. Многослойные дисперсионные элементы на основе В₄С для спектральной области $\lambda=6.7-8$ нм/ С.Ю. Зуев, Е.Б. Клюенков, К.А. Прохоров, Н.Н. Салащенко // Поверхность, 2002, N1, 27-31.*

[A15] *Зуев, С.Ю. Измерение характеристик оптических элементов рентгеновских телескопов/С.Ю.Зуев, А.В.Митрофанов//Поверхность,2002,N1,с.81-83.*

[A16] *Слемзин, В.А. Исследование временной стабильности характеристик многослойных рентгеновских зеркал для солнечного рентгеновского телескопа СРТ-К и рентгеновского спектрометра РЕС-К/ В.А. Слемзин, И.А. Житник, С.Ю. Зуев, С.В.Кузин, А.В. Митрофанов //Поверхность, 2002, №1,84-86.*

[A17] *Андреев, С.С. Изготовление асферической рентгеновской оптики с многослойным покрытием для исследований Солнца по проекту “Коронас-Ф”/ С.С. Андреев, С.Ю. Зуев, В.И. Позднякова, Н.Н. Салащенко, В.А. Слемзин, И.Л. Струля, И.А. Шерешевский, И.А. Житник//Поверхность,2003,№1,с. 6-11.*

[A18] *Бибишкин, М.С. Рефлектометрия в мягком рентгеновском и экстремальном ультрафиолетовом диапазонах/ М.С. Бибишкин, И.Г.Забродин, С.Ю. Зуев, Е.Б. Клюенков, Н.Н. Салащенко, Д.П. Чехонадских, Н.И.Чхало, Л.А. Шмаенок //Поверхность, №1. 2003. С. 70-77.*

[A19] *Бибишкин, М.С. Определение микрошероховатости поверхностей с помощью мягкого рентгеновского излучения/ М.С.Бибишкин, С.Ю. Зуев, Н.Н. Салащенко, Н.И. Чхало //Поверхность, №1. 2003. С. 94-96.*

[A20] *Бирюков, А.В. Исследование возможности получения сверхгладких подложек методом репликации эталонных поверхностей полимерными пленками/ А.В.Бирюков, Д.Г.Волгунов, С.В.Гапонов, Б.А.Грибков, С.Ю.Зуев, В.Л.Миронов, Н.Н.Салащенко, Л.А.Суслов, С.А.Тресков //Поверхность, 2003, № 1, с. 109-112.*

[A21] *Андреев, С.С. Фильтры для экстремального ультрафиолетового диапазона на основе многослойных структур Zr/Si, Nb/Si, Mo/Si и Mo/C/ С.С. Андреев, С.Ю. Зуев, Е.Б. Клюенков, А.Я. Лопатин, В.И. Лучин, К.А. Прохоров, Н.Н. Салащенко, Л.А. Суслов //Поверхность, 2003. №2. С.6-9.*

[A22] *Andreev, S.S.* Multilayer optics for XUV spectral region: technology fabrication and applications/ *S.S.Andreev, A.D. Akhsakhalyan, M.S. Bibishkin, N.I. Chkhalo, S.V. Gaponov, S.A. Gusev, E.B. Kluevnikov, K.A. Prokhorov, N.N. Salashchenko, F. Schafers, S.Yu. Zuev*//Central European Journal of Physics. CEJP 1. 2003. V. 1. N 1.P. 191-209.

[A23] *Bibishkin, M.S.* Laboratory methods for investigation of multilayer mirrors in Extreme Ultraviolet and Soft X-Ray region/ *M.S. Bibishkin, D.P. Chekhonadskih, N.I.Chkhalo, E.B. Klyuenkov, A.E. Pestov, N.N. Salashchenko, L.A. Shmaenok, I.G.Zabrodin, S.Yu. Zuev* // Proc. SPIE Vol. 5401 (SPIE, Bellingham, WA, 2004) P. 8-15.

[A24] *Бибишкин, М.С.* Рефлектометр с модернизированной оптической схемой для исследования элементов рентгенооптики в диапазоне 0,6-20 нм/ *М.С. Бибишкин, И.Г. Забродин, С.Ю. Зувев, Е.Б.Клюенков, А.Е. Пестов, Н.Н. Салащенко, Е.П. Чехонадских, Н.И. Чхало* //Поверхность,№2, 2005,-С.23-27.

[A25] *Андреев, С.С.* Многослойные дисперсионные элементы на основе Mg, предназначенные для работы на $\lambda = 30.4$ нм/ *С.С. Андреев, С.Ю. Зувев, А.Л. Мишинов, В.Н. Полковников, Н.Н. Салащенко*//Поверхность,2005,№8,9-12.

[A26] *Забродин, И.Г.* Абсолютно калиброванный измеритель ЭУФ-мощности для аттестации и оптимизации источников излучения на 13,5 нм/ *Забродин, Б.А. Закалов, С.Ю. Зувев, И.А. Каськов, Е.Б. Клюенков, А.Я. Лопатин, Н.Н. Салащенко, Л.А. Суслов, А.Е. Пестов, Н.И. Чхало, Л.А. Шмаенко* // Поверхность, №6. 2007. С. 104-107.

[A27] *Bibishkin, M. S.* Multilayer Zr/Si filters for EUV lithography and for radiation source metrology/ *M. S. Bibishkin, N. I. Chkhalo, S. A. Gusev, E. B. Kluevnikov, A. Y. Lopatin, V. I. Luchin, A. E. Pestov, N. N. Salashchenko, L. A. Shmaenok, N. N. Tsybin, and S. Y. Zuev*//Proc. SPIE 7025, 702502 (2008).

[A28] *Кузин, С.В.* Спектральные калибровки фильтров и детекторов солнечного телескопа на диапазон 13.2 нм проекта ТЕСИС/ *С.В. Кузин, С.В. Шестов, А.А. Перцов, А.А. Рева, С.Ю. Зувев, А.Я. Лопатин, В.И. Лучин, Х. Жоу, Т. Хуо* //Поверхность, 2008. № 7. С. 1-5.

[A29] *Dominique, Marie* Track membranes with open pores used as diffractive filters for space-based x-ray and EUV solar observations/*MarieDominique, A.V.Mitrofanov, J..Hochedez, P.Yu.Apel, U.Schuhle, F.A.Pudonin, O.L.Orelovich, S.Yu.Zuev, D.Bolsee, C.Hermans and A.BenMoussa*//Applied Optics/Vol. 48, No. 5, 2009, pp.834-841

[A30] *Andreev, S.S.* Multilayered mirrors based on $\text{La/B}_4\text{C(B}_9\text{C)}$ for x-ray range near anomalous dispersion of boron (1 near 6.7 nm)/ *S.S. Andreev, M.M. Barysheva, N.I. Chkhalo, S.A. Gusev, A.E. Pestov, V.N. Polkovnikov, N.N. Salashchenko, L. A. Shmaenok, Yu.A. Vainer, S.Yu. Zuev*//Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. V.603. Issues 1-2. 2009. P. 80-82.

[A31] *Володин, Б.А.* Многослойные тонкопленочные фильтры экстремального ультрафиолетового и мягкого рентгеновского диапазонов/ *Б.А. Володин, С.А. Гусев, М.Н. Дроздов, С.Ю. Зувев, Е.Б. Клюенков, А.Я. Лопатин, В.И. Лу-*

чин, А.Е. Пестов, Н.Н. Салащенко, Н.Н. Цыбин, Н.И. Чхало//Известия РАН. Серия физическая. Том 74. №1. 2010. С. 53-57.

[A32] Зуев, С.Ю. Система освещения маски ЭУФ-нанолиитографа/С.Ю. Зуев, А.Е. Пестов, В.Н. Полковников, Н. Н. Салащенко, А. С. Скрьль, И.Л. Струля, М. Н. Торопов, Н. И. Чхало// Поверхность, №6. 2011. С. 10-13.

[A33] Зуев, С.Ю. Двухзеркальный проекционный объектив нанолиитографа на $\lambda=13,5$ нм. Известия РАН/С.Ю. Зуев, А.Е. Пестов, Н.Н. Салащенко, А.С. Скрьль, И.Л. Струля, Л.А. Суслов, М.Н. Торопов, Н.И. Чхало// Известия РАН.Серия физическая. Том 75. №1. 2011. С. 61-64.

[A34] Зуев, С.Ю. Технологический комплекс для изготовления прецизионной изображающей оптики/С.Ю. Зуев, Е.Б. Клюенков, А.Е. Пестов, В.Н. Полковников, Н.Н. Салащенко, Л.А. Суслов, М.Н. Торопов, Н.И. Чхало // Известия РАН. Серия физическая. Том 75. №1. 2011. С. 57-60.

[A35] Волгунов, Д.Г. Стенд проекционного ЭУФ-нанолиитографа-мультипликатора с расчетным разрешением 30 нм/ Д.Г. Волгунов, И.Г. Забродин, А.Б. Закалов, С.Ю. Зуев, И.А. Каськов, Е.Б. Клюенков, А.Е. Пестов, В.Н. Полковников, Н.Н. Салащенко, Л.А. Суслов, М.Н. Торопов, Н.И. Чхало// Известия РАН. Серия физическая. Том 75. №1. 2011. С. 54-56.

[A36] Гусев, С.А. Отражательная маска для проекционной литографии на длине волны 13,5 нм/С.А. Гусев, С.Ю. Зуев, А.Ю. Климов, А.Е. Пестов, В.Н. Полковников, В.В. Рогов, Н.Н. Салащенко, Е.В. Скороходов, М.Н. Торопов, Н.И. Чхало//Поверхность, №7. 2012. С. 20-25.