

Схема установки ионной полировки

Фондотдача

Подготовил Андрей СУББОТИН

Окна прозрачности

Рентгеновская лаборатория мирового уровня подтверждает свой статус



Николай ЧХАЛО, отдел многослойной рентгеновской оптики Института физики микроструктур РАН (ИФМ РАН), доктор физико-математических наук



Николай САЛАЩЕНКО, главный научный сотрудник ИФМ РАН, член-корреспондент РАН

Современная рентгеновская оптика - основа самых передовых нанотехнологий. Это и формирование нанобъектов (микросхем) посредством ЭУФ (экстремального ультрафиолета) нанолитографии, и изучение внутреннего строения клеток с рентгеновским микроскопом нанометрового разрешения, и фундаментальное исследование веществ путем применения мощнейшего рентгеновского излучения - лазеров и синхротронов 4-го поколения. Значительное развитие сегодня переживает и рентгеновская астрономия. Стимулом служит интерес к процессам, происходящим на звездах, в частности, на ближайшей к нам - Солнце. Дело в том, что понимание фундаментальных проблем - например, процессов нагрева «горячей» солнечной короны (температура 1,5 миллиона градусов) от «холодной» фотосферы (температура 6000 градусов), протекания термоядерных реакций, распределения магнитных полей и плазмы - позволит человечеству приблизиться к построению своей маленькой звезды - термоядерного реактора на Земле.

Этой цели посвящены работы многих физиков мира. Отдел многослойной рентгеновской оптики Института физики микроструктур РАН (ИФМ РАН) тоже из этой команды. Возглавляемый доктором физико-математических наук Николаем ЧХАЛО коллектив начал работу по проекту, поддержанному грантом РНФ «Многослойная рентгеновская оптика дифракционного качества для перспективных задач физики, нанодиагностики и наноструктурирования конденсированного вещества», только в этом году. Но показателем лидерства, «Проведение исследований научными лабораториями мирового уровня в рамках реализации приоритетов научно-технологического развития Российской Федерации» Президентской программы исследовательских проектов, реализуемых ведущими, в том числе молодыми, учеными.

Революционное значение для рентгеновской оптики имело создание в начале 1980-х годов технологии изготовления много-

слойных рентгеновских зеркал, представляющих собой композиции из тонких пленок различных материалов. - рассказывает Николай Иванович. - Наносят их на подложки с различной формой поверхности. За цикл этих работ в 1991 году была присуждена Госпремия СССР. А дальше область применения многослойной оптики многократно расширилась, и большинство таких традиционных методов, как коллимация, фокусировка, построение изображений, поляризация излучения, стали доступными и для спектра экстремального ультрафиолетового и рентгеновского излучения. Иными словами, появились возможности управлять пространственными, угловыми, поляризационными характеристиками пучков излучения с длинами волн короче 100 нм. В рентгеновском диапазоне теперь можно получать изображения с дифракционным пространственным разрешением. По сути, мы стоим у стартовой черты нового технологического скачка - освоения коротковолнового диапазона волн. И во многом нынешние

успехи в области многослойной оптики связаны с работами коллектива исследователей из ИФМ РАН, одного из мировых лидеров в области физики и технологии изготовления многослойных металлических наноструктур. Грант РНФ поможет нам продвинуться еще на шаг вперед.

- Какие задачи вы перед собой ставите?

В последние годы мы уделяем особое внимание исследованиям, направленным на разработку прецизионной изображающей оптики нормального падения для различных задач современной физики и техники. Например, для создания объективов для стенов проекционной ЭУФ-нанолитографии (длины волн - 13,5 нм или 6,7 нм) или биологических микроскопов в спектральных областях «окон прозрачности» воды и углерода ($\lambda=2-5$ нм), разработки космических телескопов (задачи рентгеновской астрономии). Практически все российские космические станции со специализированными телескопами для изучения солнечного излучения в спектральном диапазоне 13-30 нм были оснащены многослойными зеркалами, созданными в ИФМ РАН. Например, станция CORONAS-F использует зеркала, изготовленные в ИФМ РАН и французской группой из парижского Института оптики.

- Что такое «окно прозрачности»? Разве не все живые среды прозрачны для рентгеновского излучения?

Это так и не так одновременно. Пример - коротковолновое излучение, которое применяется при рентгене в клиниках. Мы имеем проходящее сквозь ткани излучение, тем не менее на фотопленке получаем контраст, то есть какие-то ткани более прозрачны, а какие-то - менее. «Окна прозрачности» воды и углерода говорят



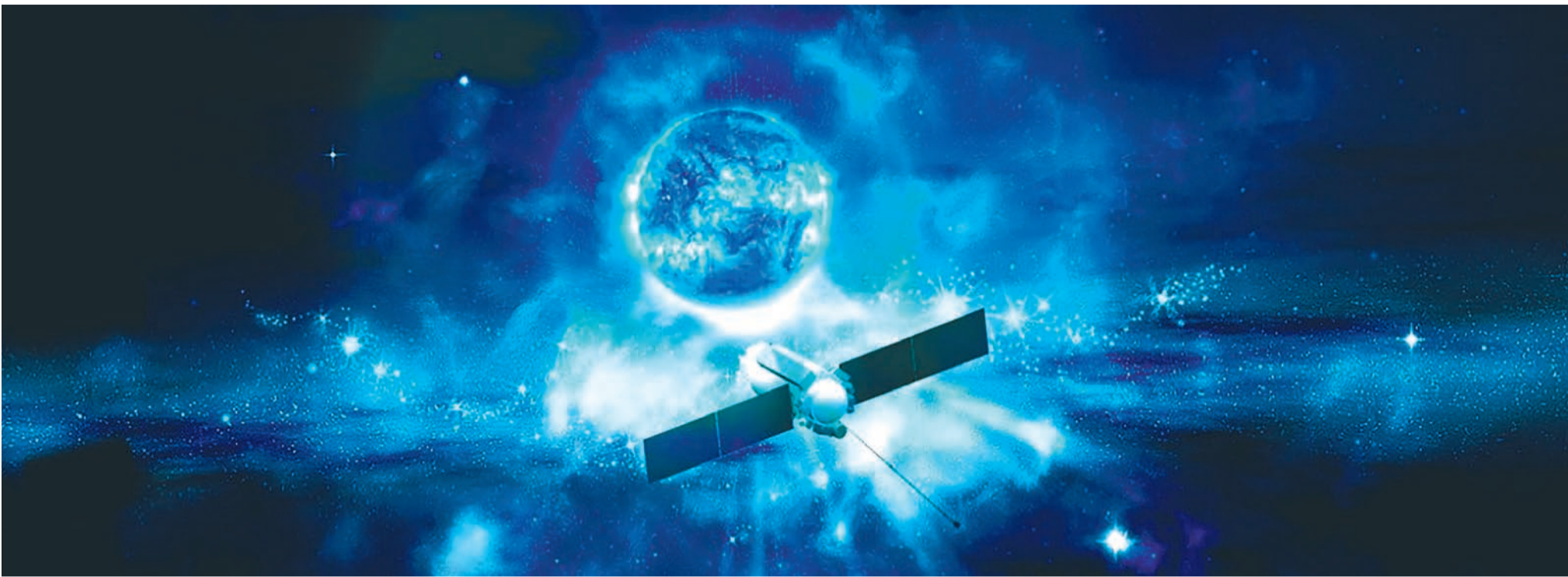
Акцент будет сделан на развитии методов изготовления многослойной оптики, обеспечивающей дифракционное качество изображений в рентгеновском диапазоне длин волн.

лишь о прозрачности одного материала в сравнении с другими. Эти области спектра открывают биологам огромные возможности в изучении строения клеток и отдельных молекул с нанометровым разрешением. В частности, в «окне прозрачности воды» наблюдается 15-кратный абсорбционный контраст между водой (кислородом в ее составе) и углеродом, что позволяет проводить анализ углеродсодержащих объектов - а это - клетки, белки, аминокислоты - в их естественной (водяной) среде.

Серьезным ограничением, сдерживающим выигрышное использование короткой длины волны излучения для получения нанометрового пространственного разрешения, являлось отсутствие светосильной прецизионной оптики, - поясняет, включившись в беседу, руководитель научной группы по гранту РНФ, главный научный сотрудник ИФМ РАН, член-корреспондент РАН Николай САЛАЩЕНКО. - Такая оптика позволяет обеспечить построение изображений с разрешением, ограниченным дифракционным пределом.

- Эти задачи вы намерены решать в рамках гранта?

Да, акцент будет сделан на развитии методов изготовления многослойной оптики, обеспечивающей дифракционное качество изображений в рентгеновском диапазоне длин волн, - поясняет Николай Николаевич. - Для этого наш коллектив планирует разработать методы химико-механической и ионно-пучковой обработки монокристаллического кремния с тем, чтобы сформировать рентгенооптические элементы для синхротронных применений, обеспечивающие субнанометровую точностью формы поверхности. Они принципиально важны для рентгеновского диапазона длин волн. Только низкая шероховатость поверхности может обеспечить высокие (десятки процентов) коэффициенты отражения многослойных зеркал.



Шероховатая поверхность даже в видимом диапазоне длин волн снижает отражение от одной поверхности, а в рентгеновском диапазоне отражение происходит от множества поверхностей, поэтому эффект шероховатости многократно усиливается. Очень большие проблемы связаны с точностью формы. Здесь мы должны получить сферу диаметром, например, 100 м с точностью 1 нм. Но все-таки основное внимание будет уделено оптимизации структуры многослойных рентгеновских зеркал.

- Расскажите про них подробнее.

- Многослойные рентгеновские зеркала (МРЗ) - это композиция из чередующихся слоев материалов с различной оптической плотностью. Отражение от одной границы раздела двух сред в рентгеновском диапазоне длин волн очень мало - сотые и тысячные доли процента. Однако если создать идеальную многослойную наноструктуру, где слоев с тысячу, а толщина каждого менее 1 нм, то отражение от каждого слоя будет суммироваться в фазе (закон Брэгга - Вульфа), и тогда удастся достичь высоких (десятки процентов!) коэффициентов отражения. Многослойные рентгеновские зеркала обладают наиболее широким спектром возможностей из всех известных рентгенооптических элементов. В отличие от кристаллов многослойное покрытие может быть нанесено на подложку с произвольной формой поверхности. Эти свойства определяют широкое использование МРЗ в литографии, астрономии и других сферах, - пояснил ученый. - Важно, что во всем мире физики работают дружно, а наш институт не просто участвует в общем деле, но и ведет за собой во многих направлениях.

По мнению Н.Салашенко, физика многослойных структур из сверхтонких пленок и есть истинная нанофизика.

- Для управления интерфейсами в МРЗ будет изучена технология «инженерии слоев», заключающаяся в насыщении незаполненных связей атомов при формировании пленок за счет

химически активных компонентов в смеси распыляющего газа. Ожидаем, что в этом случае будет подавлена химическая и диффузионная активность атомов поступающего конденсата, - продолжает погружать в тонкости проекта, поддержанного РНФ, Н.Чхало. - Впервые будет изучено влияние энергии распыляющих ионов на микроструктуру и интерфейсы в МРЗ. Впервые будет реализована функционирующая динамическая маска (микромеханическое электронное устройство - матрица микрзеркал, выступающая в роли фотошлюбка, рисунок которого может изменяться в процессе литографии) для безмасочного ЭУФ-литографа на основе диэлектрических многослойных покрытий. Все ради того, чтобы не произошло замыкание токо-

- Для этих задач, как вы понимаете, грант, рассчитанный на 4 года, не избыточен: в 2021 году мы получаем 30 миллионов рублей, в 2024-м - 24. Плюс к этому средства от софинансирования.

- Новое оборудование будете закупать?

- Вообще наша группа оказалась едва ли не единственной в мире, у которой есть и собственные технологии изготовления рентгеновской оптики, и измерительная база для сертификации ее элементов. Теперь основные отечественные исследования в области мягкого рентгеновского излучения обеспечиваем мы. Особенно это касается прецизионной изображающей оптики: каждый год появляется принципиально новая технологическая установка. Когда для обеспече-

- Подобными ресурсами располагают лишь самые высокотехнологичные компании: ZEISS (ФРГ), General Optics (США) и Nikon (Япония), - разъяснил Н.Салашенко. - Так что покупать планируется только самое необходимое. Например, собираемся приобрести для развития технологической базы пару турбомолекулярных безмасляных насосов (по 3 миллиона рублей), несколько систем напуска газов РРГ (по 400 тысяч), а также, сами понимаете, нужны материалы и комплектующие для работы: кремниевые монокристаллические пластины и заготовки для подложек, мишени для магнетронного напыления (Cr, Sc, Sr, V, Mo, Si), газы, конструкционные материалы, метизы и т.п.

- Расскажите о коллективе.

- Наш коллектив - это сплав опыта и молодости. Очень приятно, что

физики им. Г.И.Будкера СО РАН. Из иностранных партнеров активно взаимодействуем с синхротронным комплексом BESSY II (Берлин, Германия) и Институтом Оптики (Париж, Франция).

- На 2021 год что конкретно запланировано?

- Думаем запустить в работу шлюзовую камеру к установке напыления для проведения работ с химически активным стронцием, - рассказал Николай Николаевич. - Будем изготавливать экспериментальные образцы, отработаем методику нанесения Mo/Si МРЗ в смеси инертного и химически активного газа с подавленной электропроводностью. Также запланированы эксперименты с различными абразивами и смолами для отработки методики механического притира поверхностей из монокристаллического кремния. Запланированы научные конференции и Школа молодых ученых в рамках международной конференции Physics of X-Ray and Neutron Multilayer Structures 2021.

- Все результаты наши будут соответствовать или превышать (определять) мировой уровень, - заверил уже Николай Иванович. - Это относится к методам обработки и безталонной метрологии оптических поверхностей, коэффициентам отражения МРЗ для «окна прозрачности воды», к проекционному объективу дифракционного качества на длину волны 3,37 нм, обнаружению новых каналов потерь рентгеновского излучения при взаимодействии с многослойными рентгеновскими зеркалами и др. Впервые в мире будет продемонстрирована возможность создания динамической маски для безмасочной рентгеновской литографии, появление которой позволит решать широкий спектр задач, где не требуется крупносерийное производство наноструктур, в том числе нанoeлектронных компонентов.

PS. Редакция газеты «Поиск» поздравляет Николая Николаевича Салашенко с 80-летием. Юбилей - 1 ноября. Желаем ему долгих творческих лет и новых грантов! ■

“Группа оказалась едва ли не единственной в мире, у которой есть и собственные технологии изготовления рентгеновской оптики, и измерительная база для сертификации ее элементов.”

ведущих дорожек, управляющих отдельными микрзеркалами матрицы. Это позволит сформировать важнейший для безмасочной литографии элемент на базе коммерчески доступных микроэлектромеханических систем.

Мы занимаемся еще никем до сих пор не решенной задачей получения зеркал с коэффициентами отражения более 60% для диапазона длин волн 9-11 нм. Без достижения таких коэффициентов отражения невозможно развивать литографию в этом диапазоне. У нас планы грандиозные.

- Средств, выделяемых РНФ на грант, достанет на зарплаты 27 задействованным в проекте ученым и приобретение необходимого оборудования?

ния потребностей рентгеновской литографии возникла задача получения прецизионной оптики дифракционного качества, выяснилось, что сверхгладких поверхностей с формой, выполненной на субнанометровом уровне, в стране нет и сделать их никто не может. Так что поручили справиться с этой задачей сами себе и решаем ее. За короткий срок в ИФМ РАН создан целый технолого-метрологический комплекс, позволяющий производить сверхгладкую и сверхточную оптику. В его составе - интерферометр с дифракционной волной сравнения, установки ионно-пучкового травления и напыления тонких пленок, прецизионные рефлектометры.

после провала 1990-2000-х годов в науку пошла молодежь, сейчас наш отдел самый молодой в институте (средний возраст - 43 года). Приятно, что молодые проявляют интерес и инициативу, ставят и решают новые сложные задачи. За последние пять лет у нас защитились 4 кандидата наук. Это и позволило нам претендовать на такие масштабные проекты, как проект РНФ «Лаборатория мирового уровня». Плюс молодежь очень активна и развивает наши связи с научными группами как в России, так и за рубежом.

- А кто партнеры?

- Мы тесно сотрудничаем с Научно-исследовательским институтом приборов, Физическим институтом им. П.Н.Лебедева, АО «Композит» и Институтом ядерной