

Развитие многослойной рентгеновской оптики и применение в физических экспериментах и научном приборостроении в ИФМ РАН

Н.Н. Салащенко, Н.И. Чхало

1. Введение

Исследования в области многослойной рентгеновской оптики в нашем коллективе были начаты в 1978 году в рамках ИПФ АН СССР, и в этом нам очень повезло. Большую роль в развитии этих работ сыграла поддержка академика *А.В. Гапонова-Грехова*. Если бы члены немногочисленного коллектива в начале работы более отчетливо представляли требования к многослойным структурам, к подложкам и к технологии, то, скорее всего, хорошенько подумав, продолжили бы свои исследования в области сверхтонких полупроводниковых пленок и сверхрешеток. Однако в состоянии “мужества неведения” мы взяли за эту работу. Важную роль сыграли опубликованные в 1972г. работы *E. Spiller* и в 1977г. работы *А.В. Виноградова* и *Б.Я. Зельдовича*, в которых была показана реальность практического изготовления многослойных рентгеновских зеркал. В 1991 году за цикл исследований в этом направлении ряд сотрудников ИПФ были удостоены Государственной премии СССР. От ИПФ в авторском коллективе лауреатов премии было 6 человек - *А.Д. Ахсахалян, С.В. Гапонов, В.М. Генкин, Б.М. Лускин, Ю.Я. Платонов, Н.Н. Салащенко*, от ФИАНа – *А.В. Виноградов* и от Харьковского политехнического института - *А.И. Федоренко*. В настоящее время четверо из этого коллектива находятся за рубежом (В.М. Генкин, Б.М. Лускин, Ю.Я. Платонов, А.И. Федоренко), и только один из них, Ю.Я. Платонов, продолжает активно заниматься проблемами рентгеновской оптики. В лице Ю.Я. Платонова наш коллектив вырастил очень квалифицированного и востребованного исследователя для США. Выражение “вырастил”, конечно, условно, с нами рос Ю.Я., и мы вместе с ним росли, все с обратной связью. В данном случае с положительной обратной связью. И очень жаль, что вырастили именно для США, талантливый Юрий Яковлевич мог быть полезным и у нас, в стране.



*Лауреаты последней Государственной премии СССР (1991г.), тогда сотрудники ИПФ АН СССР, за цикл работ по многослойной рентгеновской оптике.
Слева направо: верхний ряд С.В. Гапонов, Н.Н. Салащенко, А.Д. Ахсахалян
нижний ряд В.М. Генкин, Б.М. Лускин, Ю.Я. Платонов.*

Однако, как это всегда бывает, большой вклад в развитие многослойной рентгеновской оптики внесли не только сотрудники, удостоенные Госпремии, но и ряд других сотрудников, которые, в принципе, также могли претендовать на премию, но, как известно, список авторов директивно ограничен. Вклад некоторых из них, особенно на начальном этапе работы, когда закладывались физические и технологические основы многослойной рентгеновской оптики, трудно переоценить. Они и сегодня готовы прийти на помощь практически в любых вопросах и, что важно, приходят. В частности, **А.А. Фраерман** внес большой вклад в части создания теоретических основ диагностики многослойных структур (МСС). **С.А. Гусев** разрабатывал методы электронной микроскопии для исследований шероховатостей поверхностей, которые хотя бы потенциально могли бы применяться в качестве подложек для МСС (*тогда мы даже не знали, существуют*

ли в принципе поверхности с субнанометровыми шероховатостями), развивал методы подготовки поперечных сколов и изучал МСС методами электронной микроскопии. Он же принимал участие в изучении свойств первых многослойных рентгеновских зеркал на синхротронном источнике ВЭПП-2М в ИЯФ СО АН СССР.



Большую роль в развитии многослойной рентгеновской оптики в ИФМ РАН сыграли А.А. Фраерман (слева) и С.А. Гусев

В последующие годы работы коллектива ИФМ РАН в области многослойной рентгеновской оптики и ее применений в различных физических экспериментах и научном приборостроении в 2008 году были отмечены премией им. А.Г. Столетова



С.В. Гапонов и Н.Н. Салащенко. Раньше мы так вдвоем часто сидели и обсуждали планы работ, новые предложения и полученные результаты. Только были мы немного моложе.

Российской академии наук. Премия была присуждена **Н.Н. Салащенко** и **Н.И. Чхало**.

Важную роль в развитии и популяризации исследований сыграли организуемые ИФМ РАН по инициативе **С.В. Гапонова** сначала (с 1997 года) Рабочие Совещания по рентгеновской оптике, а затем одна из секций более общей конференции “Нанофизика, наноэлектроника”.

В первые годы мы не имели своей измерительной

базы и измерения характеристик многослойных зеркал в мягкой рентгеновской области проводили в ИЯФ СО АН и частично в НПО “Буревестник”, в Ленинграде. Только позднее, примерно, через 2-3 года, мы поняли, что без своих измерений не сможем в дальнейшем развивать технологии, т.к. для этого нужны оперативные измерения характеристик зеркал на рабочих длинах волн. И это явилось толчком



*Ю.Я. Платонов, С.В. Гапонов, Н.Н. Салащенко.
Сентябрь 2012, ИФМ РАН.*

Мы снова, через много-много лет, вместе (хотя бы на фотографии).

Ю.Я. Платонов гражданин США и сотрудник японской компании Rigaki, такое теперь нередко встречается.

для создания собственной измерительной базы. Здесь уместно отметить, что в результате мы оказались, может быть, единственной группой в мире в области рентгеновской оптики, у которой есть и собственные технологии изготовления, и измерительная база для сертификации элементов рентгенооптики и на отражение, и на просвет

или на рабочих длинах волн, или на близких к ним длинах волн. В последнее время это касается и прецизионных измерений шероховатостей всех масштабов, и формы поверхности подложек и зеркал. В этой связи хочется отметить большой вклад **И.Г. Забродина**, который принимал активное участие в разработке технологического и измерительного оборудования на всех стадиях развития многослойной рентгеновской оптики в ИПФ и в ИФМ, и продолжает столь же активно работать в нашем коллективе в настоящее время.

Несколько позднее (в 1990г.) в наш коллектив пришел **С.С. Андреев**, который слишком рано ушел (в 2011 году) от нас, но его вклад в адаптацию технологии магнетронного распыления для нанесения многослойных структур для рентгенооптики, в разработку технологического оборудования и, главное, в подготовку молодых технологов нельзя переоценить.



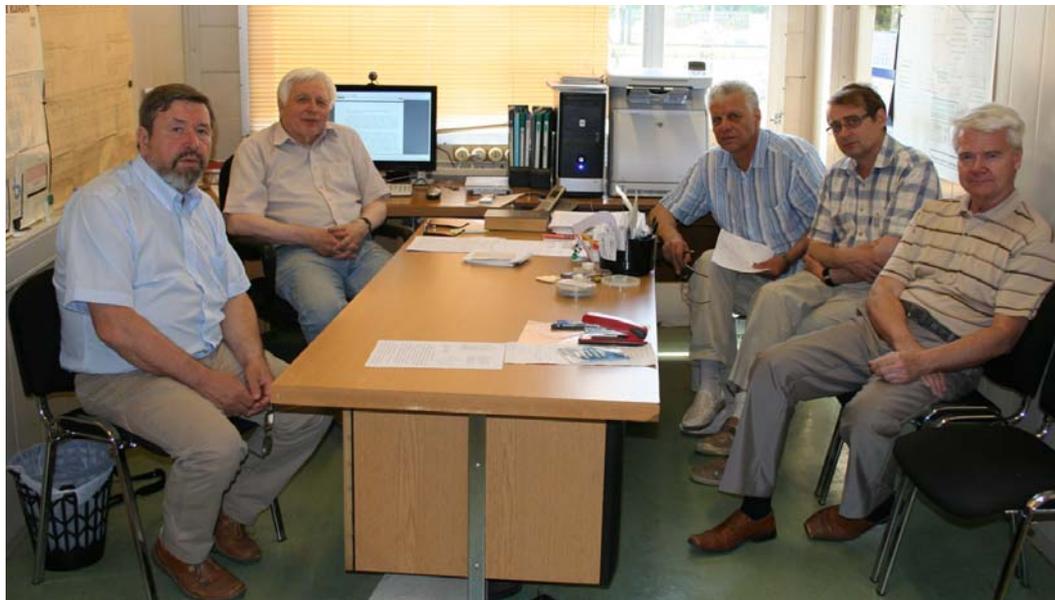
*Андреев Сергей
Сергеевич*

Естественным продолжателем дела С.С. Андреева является его прямой ученик **В.Н. Полковников**, на которого это накладывает большие обязательства не только по получению собственных научных результатов, но и по воспитанию следующих поколений технологов. А практика показывает, что хорошие технологи растут очень медленно, 7–10 лет, и это всем нам нужно учитывать, когда подводим промежуточные итоги и спрашиваем, а что ты успел сделать, когда твои сверстники (теоретики или исследователи, работающие на стандартном оборудовании) уже опубликовали вон сколько работ.

С самого начала исследования проводились в большой научной кооперации, в которой на начальном этапе большую роль сыграло взаимодействие с сотрудниками ИЯФ СО РАН, **Е.С. Глускиным** и **Г.Н. Кулипановым**. Через некоторое время в ИЯФе появился **Н.И. Чхало**, которого **Э.П. Кругляков** в 1986 году послал к нам, в ИПФ, на стажировку, как раз по тематике лазерного напыления МСС для многослойной рентгенооптики. А сейчас **Н.И. Чхало** наш основной научный сотрудник, который в значительной мере определяет направления работ в области многослойной рентгеновской оптики в ИФМ РАН. В дальнейшем большое участие в исследованиях принимали сотрудники ФТИ РАН (**С.В. Бобашев**, **Л.А. Шмаенок** и др.), ФИ РАН (**И.И. Собельман**, **В.А. Слемзин**, **А.П. Шевелько** и др.), ИК РАН (**М.В. Ковальчук**, **С.И. Желудева** и др.), МГУ (**А.В. Андреев**, **Ю.В. Пономарев** и др.), НПО «Буревестник» (**И.А. Брытов**, **А.Я. Грудский**), Института физики плазмы, Нидерланды (**F. Bijkerk**), Синхротронного центра BESSY, ФРГ (**F. Schaefers**), и др.

Реально и раньше, и в настоящее время все предстоящие работы, полученные результаты и имеющиеся проблемы проходят широкое и всестороннее обсуждение в коллективе. И в первую очередь, особенно текущие проблемы, проходят обсуждение на своеобразном «совете старейшин». Такой условный «совет

старейшин» может иметь переменный состав, в зависимости от обсуждаемого вопроса, но, как правило, квазипостоянный состав включает ведущих сотрудников отдела. Одно из текущих заседаний «совета старейшин» показано на фотографии.



«Заседание» квазипостоянного «совета старейшин» по направлению многослойной рентгеновской оптики.

Е.Б. Ключенков, Н.Н. Салащенко, А.Д. Ахсаляян, Н.И. Чхало, В.И. Лучин.



Женщины отдела (слева - направо): сидят - Е.Н. Садова, З.Л. Кожевникова, М.М. Барышева; стоят – М.В. Зорина, Н.А. Короткова, В.А. Тюрина.

Можно признать, что работа наша преимущественно мужская, экспериментальная, зачастую связанная с собственной разработкой специального оборудования. Поэтому, кажется, что на работу мы, как правило, берем преимущественно лиц мужского пола. Но оказалось, что это не совсем так. Ниже приведена отдельная фотография наших женщин. Во-первых, их не так уж и мало, а во-вторых, их полезность в работе никем не может оспариваться.

В настоящей статье мы приводим наиболее интересные и значимые результаты исследований как в области развития многослойной оптики для коротковолнового диапазона ($\lambda=0.01 - 60$ нм), так и её приложений в различных физических экспериментах и научном приборостроении, полученные в ИФМ РАН за последние 20 лет, т.е. за годы существования ИФМ РАН.

Отметим, что многослойная рентгеновская оптика с периодами структур $d \approx 1-30$ нм является типичным изделием нанотехнологии. Примером может служить проблема изготовления многослойных дисперсионных элементов и изображающей оптики с периодами $d=1-2$ нм при числе эффективно отражающих периодов $N=300-1000$, когда отклонение величины периода по глубине и в плоскости покрытия не должно превышать $\delta d \approx d/N \approx (1-5) \cdot 10^{-3}$ нм. Понятно, что такие точности определяют требования к стабильности технологического процесса нанесения МСС.

Для совершенствования технологии необходимо хорошо знать такие внутренние параметры многослойной структуры, как период и соотношение толщины слоев в периоде, реальные плотности материалов слоев, неровности границ раздела слоев и ширины интерфейсов между слоями. В случаях, когда сами толщины слоев сравнимы с их кристаллографическими параметрами, трудно говорить и о ширине интерфейса, и о конкретных параметрах самих слоев. Диагностика короткопериодных структур является самостоятельной и важной задачей.

Направления исследований коллектива связаны с созданием элементной оптической базы для спектрального диапазона $\lambda \approx 0.01-100$ нм и включают следующие разделы.

- Совершенствование многослойной «рентгеновской» оптики
 - оптимизация МСС для различных спектральных диапазонов
 - развитие методов диагностики и изучение физических процессов в МСС
- Развитие технологии изготовления элементов «рентгеновской» оптики
 - развитие технологического оборудования и технологии нанесения МСС
 - совершенствование систем формирования «жесткого» ($\lambda \approx 0.05-0.2$ нм) рентгеновского излучения
 - развитие методов прецизионной коррекции и метрологии формы поверхности
 - развитие технологии изготовления свободновисящих (без подложек) элементов рентгенооптики (многослойные зеркала и абсорбционные фильтры)
- Перспективное приборостроение, связанное с разработкой оборудования для диагностики многослойных пленочных структур и приборов на основе элементов многослойной рентгеновской оптики
 - новое диагностическое оборудование
 - оборудование для контроля и коррекции формы поверхности
 - стенды проекционной «рентгеновской» литографии и микроскопии.

Нужно отметить, что реально направления исследований в области развития многослойной оптики в ИФМ РАН в значительной мере определяются потребностями разнообразных практических применений. В частности, предполагают развитие многослойной оптики для применений в качестве многослойных дисперсионных элементов для рентгеновской диагностики плазмы и для рентгено-флуоресцентного элементного анализа, для формирования пучков жесткого рентгеновского излучения ($\lambda = 0.01-0.2$ нм) с целью повышения (в десятки раз) эффективности использования рентгеновских трубок, для оснащения каналов на синхротронах. В последнее десятилетие особое место у нас стали занимать исследования, направленные на разработку прецизионной изображающей оптики нормального падения коротковолнового диапазона для различных задач современной физики и техники. Например, для создания на их основе объективов

для стан­дов проек­ционной EUV нанолито­графии (длины волн 13.5 нм или 6.7 нм) или для биоло­гических микроско­пов в спек­тральных об­ластях “о­кон про­зрач­ности” воды и уг­лерода ($\lambda=2-5$ нм), для раз­работки кос­мических телеско­пов для за­дач рент­геновской ас­тро­номии.



Основные применения многослойной «рентгеновской» оптики, разрабатываемой в ИФМ РАН

Ключевым параметром, характеризующим системы изображения, является пространственное разрешение, которое ограничивается дифракцией света на выходной апертуре оптической системы. В соответствии с критерием Рэлея дифракционный предел разрешающей способности оптической системы $\delta x = k \cdot \lambda / NA$ определяется длиной волны λ и числовой апертурой объектива NA ($NA = n \cdot \sin \alpha$, n – показатель преломления среды между объективом и плоскостью изображения, α – половина выходной угловой апертуры объектива), где k – коэффициент пропорциональности. Коэффициент k определяется когерентными свойствами света и способом освещения объекта и изменяется в пределах от 0.25 до 0.77, для некогерентного облучения он составляет $k=0.61$. Таким образом, разрешение систем изображения составляет примерно половину длины волны, или для оптического диапазона - более 100 нм. Это ограничение вошло в противоречие с освоением нано-мира (характерные размеры менее 100 нм), что, в частности, в свое время поставило под угрозу нарушения закон Мура - удвоение плотности электронных компонентов (транзисторов) в чипе каждые полтора года.

В области производства микросхем (фотолитография) это стало поводом для поиска альтернативных способов формирования микроструктур, например, с помощью зондовых микроскопов. Широкие исследования проводятся в направлении развития многолучевой и проекционной электронной и ионной литографий, технологии нано-принтинга. Все эти методы уже нашли свои ниши и продолжают развиваться, тем не менее, для массового производства микросхем традиционная фотолитография оказалась вне конкуренции. Это стало возможным благодаря широкому применению, так называемых, методов улучшения разрешающей способности. Среди них можно выделить чисто оптические, уменьшающие коэффициент k , например, за счет наклонного освещения и оптимизации когерентных свойств излучения, падающего на маску, применение корректирующих, фазосдвигающих или поглощающих слоев на маске. Почти в полтора раза удалось улучшить разрешение за счет применения иммерсионных жидкостей. Потенциал иммерсии еще не исчерпан, и продолжают поиски новых жидкостей с большим показателем преломления. К не оптическим методам улучшения разрешения можно отнести технологии, использующие физико-химические свойства фоторезистов и поэтапное формирование топологического рисунка, когда, например, элементы формируются через период (double patterning).

Современные литографы (сканеры) на рабочей длине волны экспонирования фоторезиста 193 нм и стандартные технологические процессы уже сейчас обеспечивают разрешение до 22 нм. Практически пятикратное “преодоление” дифракционного предела разрешающей способности связано с усложнением и, соответственно, удорожанием оборудования и технологии производства чипов. Вместо простейшей процедуры формирования топологии, включающей нанесение фоторезиста на пластину, экспонирование и проявление – появляются десятки новых операций.

Если в литографии еще удастся заметно продвинуться в область нанометровых разрешений, то в микроскопии из всех методов улучшения разрешающей способности, по сути, работает только иммерсия. В достижении предельного пространственного разрешения классическая микроскопия фактически уже исчерпала свои возможности. Альтернативой является оптическая ближнепольная микроскопия, позволяющая достичь разрешения на уровне

десятков нанометров. Однако, как и в литографии, ценой этого являются сложные системы сканирования и ряд функциональных ограничений.

Достижение нанометрового разрешения в классических схемах микроскопии и фотолитографии возможно, если использовать более короткие длины волн, порядка 10 нм и короче. Эффективность такого подхода продемонстрировали работы в области проекционной ЭУФ литографии на длине волны 13.5 нм. Уже на первых экспериментальных литографических установках было получено пространственное разрешение, ограниченное дифракцией и не уступающее на тот момент разрешению “продвинутых” литографов, работающих на длине волны 193 нм. В последнее время для литографии следующего поколения активно обсуждается новая длина волны $\lambda \approx 6.7$ нм.

Наряду с перспективой увеличения пространственного разрешения диапазоны мягкого рентгеновского и экстремального ультрафиолетового излучения ($\lambda \sim 1-60$ нм) по ряду причин являются весьма интересными для экспериментальной физики, астрономии, химии и биологии. Так энергетические уровни большинства атомов лежат в этой спектральной области, что обуславливает резонансный характер взаимодействия излучения с веществом, обеспечивая, тем самым, исследователей уникальной и достоверной информацией о внутреннем строении атомов и их взаимодействии с ближайшим окружением. Максимумы собственного излучения лабораторной плазмы, а так же линейчатое излучение ионов основных примесей лежат в этом диапазоне, что делает рентгеновскую спектроскопию наиболее удобной для диагностики плазмы. Линейчатое излучение короны Солнца является одним из наиболее достоверных источников информации о физических процессах, протекающих на Солнце. Слабое рассеяние и достаточно большая глубина проникновения излучения в вещество позволяют проводить томографические исследования “толстых” объектов, что в сочетании с нанометровым разрешением открывает новые перспективы для физических исследований конденсированного вещества, в химии и микробиологии. Слабое поглощение излучения с энергией меньше потенциала ионизации и резкий скачок поглощения при превышении энергии связи в ряде случаев обеспечивают столь высокий контраст абсорбционных изображений (например, протеинов в водной среде), что для получения качественного изображения объекта требуется доза облучения на

несколько порядков меньше, чем при использовании “нерезонансного” рентгеновского излучения или быстрых электронов. В ряде случаев это имеет принципиальное значение, так как позволяет изучать “живые” биологические образцы с разрешением в десятки нанометров или органические объекты с размерами единицы-десятки нанометров, находящиеся в “толстой” (>1 мкм) матрице, например, в водной суспензии.

Сочетание возможностей рентгеновских методов изучения вещества (дифрактометрия, рентгеновская и фотоэлектронная спектроскопия, малоугловое рассеяние и др.) с достижением нанометрового пространственного разрешения открывает уникальные перспективы в нанофизике конденсированного вещества.

Серьезным ограничением, до последнего времени сдерживающим возможное выигрышное использование короткой длины волны ЭУФ и МР излучения для достижения нанометрового пространственного разрешения, являлось отсутствие светосильной прецизионной оптики, позволяющей обеспечить построение изображений с разрешением, ограниченным дифракционным пределом. В этом направлении последние годы наш коллектив проводит довольно широкие исследования (широта исследований определяется не только нашими ограниченными силами, но и финансовыми возможностями) в области изготовления, метрологии и в применении в исследованиях прецизионной рентгеновской оптики. Большое внимание уделяется короткопериодным многослойным зеркалам, являющихся основой данной оптики, а также методам изучения неровностей супергладких поверхностей подложек для многослойных зеркал во всем спектральном диапазоне пространственных частот, определяющих формирование изображений с субнанометровой точностью. Наряду с очевидными применениями в литографии и микроскопии, рассматриваем возможности применения прецизионной рентгеновской оптики для диагностики поверхности с нанометровым пространственным разрешением и для формирования сверхсильных электромагнитных полей.

Последние годы большое внимание уделялось исследованиям по оптимизации многослойной оптики для проекционной литографии на длине волны 13.5 нм. Эти исследования включают повышение отражательной способности зеркал, развитие

методов компенсации внутренних механических напряжений в *Mo/Si* отражающих МСС, создание прецизионной асферической изображающей оптики, развитие методов контроля и управления спектром пространственных частот шероховатостей поверхности, разработку методов реставрации чрезвычайно дорогих асферических подложек после любого неудачного нанесения многослойного покрытия. А неудачное нанесение покрытий очень вероятно, т.к. изготовление оптических элементов для схем проекционной литографии предполагает нанесение МСС с заданным распределением периодов по апертуре подложки с точностью до 0.01 нм. Следующее поколение нанолитографов предполагается разрабатывать на более короткой длине волны излучения, около 6.7 нм, что, по крайней мере, в два раза повышает требования на точность оптических элементов.

В области совершенствования многослойной оптики для решения проблем рентгеновской астрономии можно отметить, что практически все Российские космические станции со специализированными телескопами для изучения солнечного излучения в спектральном диапазоне 13-30 нм, были оснащены многослойными зеркалами, изготовленными в ИФМ РАН. Например, станция "*CORONAS-F*" оснащена зеркалами, изготовленными в ИФМ РАН и французской группой из Института оптики, Париж. Для этого проекта был разработан процесс асферизации зеркал с помощью нанесения на исходно сферическую подложку дополнительного буферного многослойного покрытия с необходимым для заданной асферизации распределением величины периода по поверхности. В последующем на эту подложку наносится отражающее покрытие с периодом, соответствующим рабочей длине волны. По такой технологии были изготовлены внеосевые параболические зеркала с многослойным покрытием *Mo/Si* на спектральные диапазоны 17.5 и 30.4 нм, имеющие угловое разрешение ~ 1 угл. сек. В этих участках спектра содержатся наиболее интенсивные линии ионов *Fe IX – Fe XI* и *He II*, излучающиеся из солнечной плазмы в широком диапазоне температур от $2 \cdot 10^4$ до $1,3 \cdot 10^6$ К, и достигается высокая эффективность регистрации при использовании многослойных зеркал нормального падения в сочетании с тонкопленочными фильтрами. Новые задачи “рентгеновской” астрономии (на

ближайшие 5-10 лет) предполагают дальнейшее существенное развитие технологий изготовления прецизионной изображающей оптики и разработку нового поколения спектральных фильтров, о которых более подробно будет рассказано ниже.

В результате проведения всесторонних исследований, в том числе и членами коллектива из ИФМ РАН, область применений многослойной “рентгеновской” оптики многократно расширилась, большинство методов традиционной оптики (коллимация, фокусировка, построение изображений, поляризация излучения) стали доступными и для спектральной области экстремального ультрафиолетового и рентгеновского излучения. Появились возможности управления пространственными, угловыми, поляризационными характеристиками пучков рентгеновского излучения, получать изображение в рентгеновском диапазоне с дифракционным пространственным разрешением. По сути, мы стоим на пороге нового технологического скачка, связанного с освоением коротковолнового диапазона длин волн. И хотя ряд важных проблем еще предстоит решить, этот диапазон интенсивно осваивается. Во многом современное состояние дел в области многослойной оптики связано с работами коллектива исследователей из ИФМ РАН.



Сотрудники ИФМ РАН, которые активно работают (или работали ранее) в области многослойной “рентгеновской” оптики (слева-направо) сидят: А.И. Кузьмичев, А.Д. Ахсахалян, С.В. Гапонов, Н.Н. Салащенко, В.И. Лучин, Е.Б. Ключенков, А.А. Фраерман; стоят: З.Л. Кожевникова, С.Д. Стариков, В.А. Тюрина, В.В. Rogov, Б.А. Володин, И.А. Каськов, П.К. Гайкович, Н.А. Короткова, С.А. Гусев, В.Н. Полковников, И.Г. Забродин, М.Н. Дроздов, Л.А. Мазо, М.Н. Торопов, В.В. Зорина, С.А. Чурин, А.Е. Пестов, Е.Н. Садова, Н.Н. Цыбин, Д.Е. Парьев, М.М. Барышева, С.Ю. Зуев, А.Ю. Климов, Н.И. Чхало, А.И. Харитонов, А.А. Ахсахалян, А.Я. Лопатин, Ю.А. Вайнер.

2. Технологическое и исследовательское обеспечение работ в области многослойной коротковолновой оптики

Основой работ в области многослойной рентгеновской оптики является их технологическое и исследовательское обеспечение. В нашей группе в первые десять лет технология изготовления элементов многослойной рентгенооптики основывалась на методе импульсного лазерного напыления и развивалась параллельно с развитием этого метода. Все это было в рамках ИПФ АН. Нужно иметь в виду, что, так как при лазерном напылении можно обойтись мишенями размером порядка $1 \times 1 \text{ см}^2$, то технология лазерного напыления очень удобна, когда нужно провести поиск оптимальных материалов для многослойного зеркала, которое должно работать в конкретном спектральном диапазоне. И пока размеры зеркал и для исследований, и для ряда применений (в основном в качестве дисперсионных элементов) ограничивались $\approx 5 \text{ см}$, технология лазерного напыления вполне удовлетворяла. Но когда возникла необходимость изготовления зеркал на подложках больших размеров, до 20-30 см, стало понятно, что необходимо осваивать и развивать технологию магнетронного распыления. Некоторое время было сочетание обеих технологий, а затем полностью перешли на технологию магнетронного распыления.

Переход к технологии магнетронного распыления занял около трех лет. В разработке и освоении собственных магнетронных установок и технологии большое упорство проявили *Е.Б. Ключенков, С.С. Андреев, Б.А. Закалов, Л.А. Суслов, И.Г. Забродин* и *И.А. Каськов*. Практически сразу мы остановились на магнетронах диаметром 150 мм, что позволяет при зоне эрозии $\approx 100-120 \text{ мм}$ надежно наносить МСС с равномерностью или с заданным распределением толщины слоев с точностью в десятые доли процента (до $\approx 0.1-0.2\%$) при размере подложек до 200 мм. Параллельно были разработаны магнетроны с размерами мишеней $160 \times 350 \text{ мм}$ для реализации возможности наносить многослойные покрытия на подложки диаметром до 350 мм.

Нужно отметить, что это были 1993-1994 годы, и мы изготавливали оборудование, которое в эту минуту было нам не только по силам, но и по финансовым возможностям. Поэтому начали с установок на основе только двух

магнетронов и с диаметром вакуумной камеры ≈ 50 см. В дальнейшем, конечно, не стало хватать и количества магнетронов, и вакуумная камера оказалась слишком мала.



Фотография группы технологии нанесения многослойных структур рентгенооптики.

Слева-направо: В.Н. Полковников, Б.А. Володин, Н.Н. Цыбин, Л.А. Суслов, Д.Е. Парьев, Л.А. Мазо, П.К. Гайкович, Е.Б. Ключенков, С.Д. Стариков.



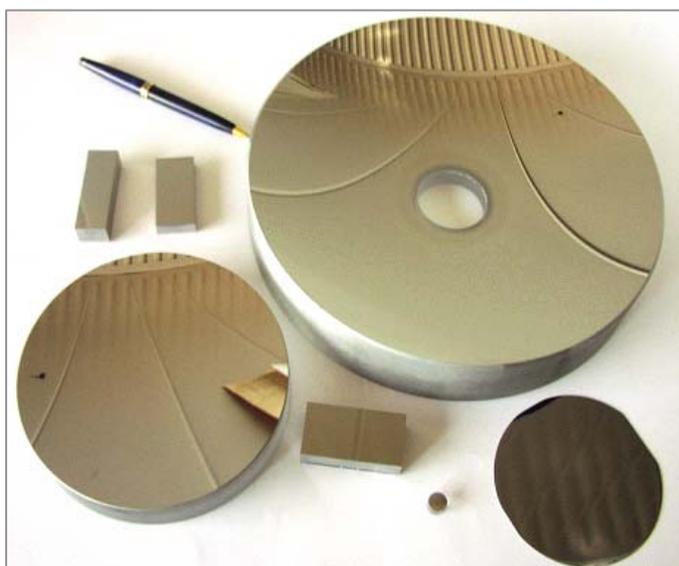
Технологическая установка с шестью магнетронами для нанесения многослойных структур.

На переднем плане нынешний “хозяин” этой установки Б.А. Володин.

Наиболее интересные результаты в части изготовления многослойных структур для элементов многослойной рентгеновской оптики во всем мире на сегодняшний день получены с применением технологии магнетронного

распыления. Применение установок с большим числом одновременно работающих магнетронов позволяет наносить пленочные структуры, в которых кроме основных отражательных слоев в едином вакуумном цикле могут наноситься “жертвенные” слои, чтобы изготавливать свободностоящие многослойные структуры, при необходимости можно наносить антистрессовые и антидиффузионных слои. В частности, были разработаны и изготовлены технологические установки, в которых одновременно могли работать до шести магнетронов.

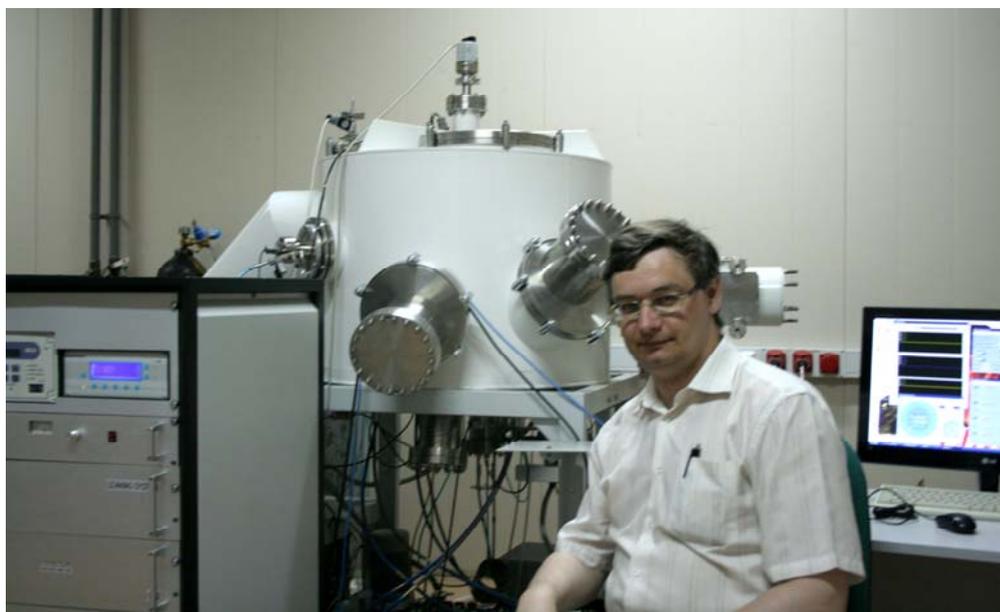
Можно надеяться, что возможности технологии магнетронного распыления еще до конца не исчерпаны, но нужно признать, что сегодня наблюдается некоторый застой в получении новых результатов в многослойной рентгеновской оптике. Этот застой наблюдается, например, в изготовлении короткопериодных МСС (период $d=1-3$ нм), применяемых в качестве дисперсионных элементов для рентгеновской диагностики плазмы или в качестве изображающей оптики в диапазоне длин волн $\lambda=2-5$ нм. Большие проблемы наблюдаются при нанесении многослойных структур на основе материалов с высоким химическим или/и диффузионным взаимодействием. В этом случае, как правило, наблюдается аномально большое размытие межслоевых границ и, как следствие, уменьшение отражательной способности зеркал.



Типичные изделия многослойной рентгеновской оптики, включающие плоское зеркало диаметром 100 мм, вогнутую и выпуклую сферы с максимальным диаметром 260 мм, параболический и эллиптический цилиндры.

С целью изучения возможности управления шириной межслоевых границ в МСС был разработан и изготовлен технологический стенд, в котором сочетаются возможности нанесения многослойных структур методом магнетронного

распыления (стенд включает четыре магнетронных источника) и ионно-пучкового распыления (имеется два ионных источника).



Многофункциональный стенд для нанесения МСС методами магнетронного и ионно-пучкового распыления, включая возможность полировки границ раздела слоев низкоэнергетичными ионами.

В стенде предусмотрена возможность одновременного применения обоих методов распыления, что может представлять интерес при нанесении МСС, включающих слои материалов, трудно распыляемых магнетронным распылением. Например, методом магнетронного распыления очень трудно наносить пленки чистого бора, интерес к которым сегодня очень высок в связи с разработкой оптики для спектральной области 6.7 нм на основе пары материалов La/B , потенциально интересной для развития следующего поколения станков проекционной литографии. Существуют проблемы с распылением и других мишеней на основе легких элементов, таких как C и B_4C .

Учитывая, что бор и углерод обладают аномально большими химическим и диффузионным взаимодействием со многими материалами, в стенде предусмотрена возможность ионной полировки каждой границы раздела слоев и с этой целью введены дополнительно два источника низкоэнергетичных ионов. Мы исходили из предположения, что “полировка” низкоэнергетичными ионами позволит убирать верхнюю часть слоя с пониженной плотностью и тем самым будет способствовать уменьшению перемешивания материалов слоев.

Разработанный макетный образец многофункционального технологического стенда можно рассматривать как полигон для дальнейшего развития технологий нанесения многослойных структур для элементов рентгеновской оптики.

Параллельно с развитием технологий изготовления элементов многослойной рентгеновской оптики развивались методы диагностики и измерительное оборудование для характеристики МСС и сертификации элементов оптики. Основой или первым приближением для рентгеновской диагностики МСС, нанесенных на плоские подложки, являются измерения угловых зависимостей коэффициентов отражения зеркал методом рентгеновской дифрактометрии. Долгое время мы для таких измерений использовали отечественные дифрактометры типа ДРОН-3 и ДРОН-4. И нам казалось, что все в порядке, что на таком оборудовании можно изучать даже короткопериодные МСС. Но около 10 лет назад у нас появились дифрактометры компании Philips (затем компания Panalytical) и оказалось, что только теперь мы можем достаточно достоверно характеризовать свои МСС, особенно это касается короткопериодных зеркал.

Зато для измерений характеристик зеркал в мягком рентгеновском и в ВУФ диапазонах ($\lambda=0.6-200$ нм), в которых традиционно измерения проводятся на синхротронах, у нас были разработаны оригинальные рефлектометры на основе собственных (очень удачных) разборных рентгеновских трубок ($\lambda=0.6-20$ нм) и в более длинноволновой области на основе (также собственных) газоразрядных источников излучения. В разработке рефлектометра большая роль принадлежит **С.Ю. Зуеву**, он полностью и разработал, и собрал, и наладил первый рефлектометр. Следующий усовершенствованный вариант рефлектометра был разработан под руководством **Н.И. Чхало**, и таким образом мы сейчас можем сами паспортизовать элементы многослойной оптики и на отражение, и на просвет практически на заданных длинах волн, не прибегая к помощи синхротронов. Правда, предварительно были проведены сравнительные измерения тестовых образцов у нас и на синхротроне BESSY-2, которые показали хорошее совпадение и получили признание у специалистов. Здесь представляется уместным отметить зачастую принципиальную необходимость прецизионных измерений характеристик элементов многослойной оптики, которые периодически проводятся на каналах синхротрона BESSY-2. Обычно измерения для нас проводит, может быть, лучший

в мире экспериментатор в части синхротронных исследований оптики наш старый товарищ доктор *Franz Schäfers*.



*F. Schäfers,
N. Salashchenko,
2003.*

Дополнительно, используя возможности ИФМ РАН и, в частности, центра коллективного пользования, полный комплекс изучения свойств МСС включает зондовую (АСМ) и электронную микроскопии, послойную спектроскопию методом вторичных ионов (ВИМС).

Ранее с применением метода стоячих рентгеновских волн (совместно с сотрудниками ИК РАН), рентгеновской дифрактометрии, EXAFS и Мессбауэровской спектроскопии (совместно с сотрудниками МГУ и СПбУ), были изучены внутренне строение МСС, процессы на границах слоев и в слоях МСС практически всех типов, представляющих интерес с точки зрения изготовления многослойной оптики рентгеновского диапазона. Эти работы заложили основы методов комплексного изучения МСС и стали базой современных представлений о физике и технологии многослойных рентгеновских зеркал.

Создание технологической и исследовательской базы многослойной рентгенооптики сопровождалось получением новых физических результатов, из которых наиболее значительными можно признать следующие.

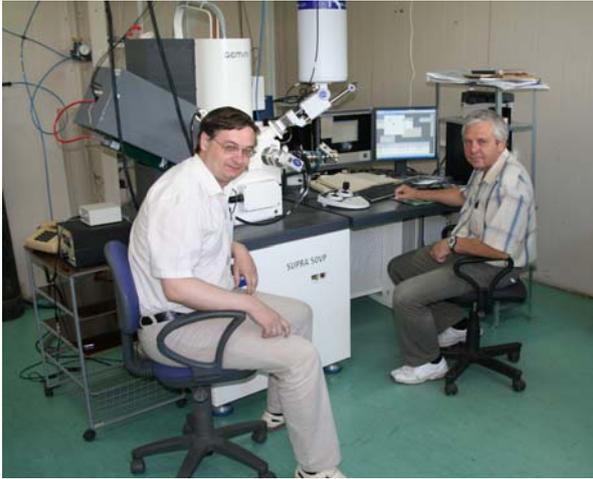
- Развита методика определения структурных параметров МСС по данным рефлектометрии в рентгеновском диапазоне длин волн.
- Предсказан и изучен эффект самосогласования границ в МСС, приводящий к повышению разрешающей способности зеркал.

- Детально изучены диффузионные процессы в многослойных структурах.
- Исследованы рентгеновские волноводные моды в слоистых структурах.
- Обнаружены и изучены эффекты резонансного усиления диффузного рассеяния в гетероструктурах волноводного типа.
- Предложена и изучена новая МСС Cr/Sc , ставшая базовой для спектральной области “водного” окна прозрачности.



*Группа диагностики МСС и характеристики элементов рентгеновской оптики.
 Слева направо: С.Ю. Зуев, А.Е. Пестов, Н.И. Чхало, Ю.А. Вайнер, М.В. Зорина, М.Н. Торопов. На заднем плане можно видеть рефлектометр для изучения рентгенооптических характеристик зеркал в спектральной области 0.6 – 20 нм.*

По своим возможностям и техническим характеристикам созданная метрологическая база уникальна даже на мировом уровне и широко используется как отечественными, так и иностранными разработчиками и исследователями для калибровки элементов рентгеновской оптики, спектральной аппаратуры и детекторов рентгеновского излучения.



Исследования многослойных структур на электронном микроскопе (фотография слева) проводят С.А. Гусев и В.Н. Полковников и на ВИМС – М.Н.Дроздов и Н.Н. Цыбин.

В заключение этого раздела хочется отметить большую роль талантливого (и практически единственного у нас) конструктора **Б.А. Закалова**, коллектива макетной мастерской института во главе с **Н.Г. Гуськовым** и заведующего технологической лабораторией **Е.Б. Клюенкова** в создании совместно с сотрудниками отдела «Многослойной рентгеновской оптики» всего многообразия технологического и метрологического оборудования. Это оборудование практически нельзя купить, а можно только самим разработать и изготовить, и которое стало основой для наших научных и технологических исследований и достижений.



Разработчики технологического оборудования. Слева – направо: Б.А. Закалов, В.Н. Полковников, И.А. Каськов, Е.Б. Клюенков, И.Г. Забродин, Н.Г. Гуськов.

3. Физика, технология и диагностика многослойных структур для мягкого рентгеновского и экстремального ультрафиолетового диапазонов

С развитием технологии синтеза МСС с ультракороткими ($d \approx 1-3$ нм) периодами в рентгеновской оптике появилась реальная альтернатива зонным пластинкам для построения изображений с высоким пространственным разрешением. Само появление многослойной рентгеновской оптики можно считать одной из революционных нанотехнологий конца 20-го столетия, а за последние 30 лет область ее применения многократно расширилась и большинство методов традиционной оптики (коллимация, фокусировка, построение изображений, поляризация излучения) стали доступными и для МР и ЭУФ областей.

Многослойные рентгеновские зеркала представляют собой периодические структуры, состоящие из слоев материалов с различными оптическими константами, по аналогии с интерференционными зеркалами для оптического диапазона. Спецификой рентгеновских зеркал являются предельно малые периоды (в соответствии с условием Брэгга при нормальном падении период структуры, состоящий из двух пленок, примерно равен $\lambda/2$), до 1 нм, большое число, до 1000, периодов и сильное поглощение практически всех материалов. Необходимость большого числа периодов вызвана низкими коэффициентами отражения от одной границы $R_{12} \approx |(\epsilon_1 - \epsilon_2)/4|^2$, где $\epsilon_{1,2}$ - диэлектрические проницаемости материалов пленок. Например, коэффициент отражения от границы вакуум-кремний на длине волны $\lambda = 1$ нм составляет $R = 2 \cdot 10^{-8}$ и даже для такого тяжелого материала как золото он не превышает $R = 6 \cdot 10^{-7}$.

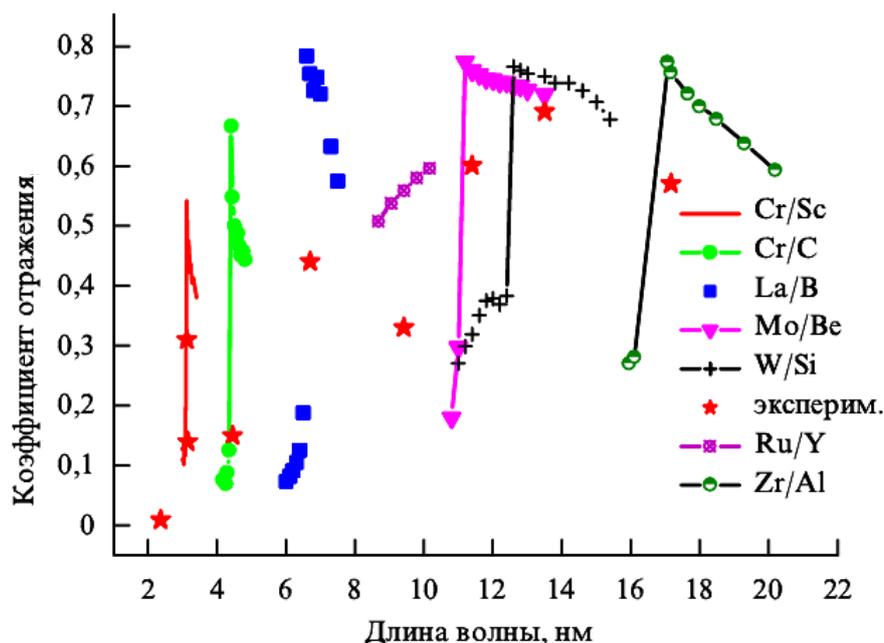
При выборе пар материалов МСС для решения конкретных задач необходимо руководствоваться следующими основными условиями. Во-первых, выбрать оптимальное сочетание оптических констант материалов, обеспечивающее максимальные коэффициенты отражения на заданной длине волны. Во-вторых, материалы слоев должны минимально химически взаимодействовать, чтобы не снижать оптический контраст на границах. В-третьих, материалы слоев должны наноситься на подложки методами вакуумного напыления, а их рост должен происходить без заметного развития шероховатости поверхности пленок. Проблема осложняется тем, что физико-химические свойства сверхтонких слоев

могут заметно отличаться от свойств массивного материала и при выборе нового материала требуется проведение комплекса исследований.

В первых работах материалы МСС выбирались из соображений максимального скачка оптической плотности (материал с большим Z)/(материал с малым Z), типа Au/C , W/C . В дальнейшем оказалось, что более плодотворен подход, когда в качестве слабопоглощающего материала выбирается такой, у которого K - или L - края поглощения на шкале длин волн находятся немного короче, чем рабочая длина волны. Оптимально, если рабочая длина волны соответствует области аномальной дисперсии материала: в этом случае для него характерно минимальное поглощение и максимальный, в ряде случаев превышающий единицу, показатель преломления. Выбор сильнопоглощающего материала представляет собой компромисс между поглощением излучения и скачком электронной плотности на границе. Такой подход хорошо иллюстрируют Cr/Sc МСС.

Хром ($Z=24$) и скандий ($Z=21$) близки в периодической системе элементов, и у них мала разность электронной плотности. Однако в области аномальной дисперсии скандия в окрестности L_{III} – края поглощения ($\lambda_L=3.11$ нм), где действительная часть диэлектрической проницаемости может быть больше единицы, а хром поглощает слабо, для этой пары материалов наблюдаются максимальные коэффициенты отражения. Начиная с первых работ по таким зеркалам, которые затем имели широкое продолжение, в качестве парного материала для скандия применяется именно хром, как наименее взаимодействующий со скандием.

К настоящему времени, имеется ограниченный набор пар материалов, удовлетворяющих перечисленным выше требованиям. Из наиболее совершенных короткопериодных зеркал можно отметить зеркала на основе W/B_4C , минимальные периоды которых достигают ≈ 1 нм. На основе таких МСС можно изготавливать зеркала нормального падения для излучения с минимальной длиной волны ≈ 2 нм, что может представлять интерес, например, для получения изображения объектов в спектральной области вблизи K -края поглощения кислорода ($\lambda \geq 2.36$ нм). Однако уже в области $\lambda > 3.1$ нм существенно более высокую отражательную способность имеют МСС на основе скандия.



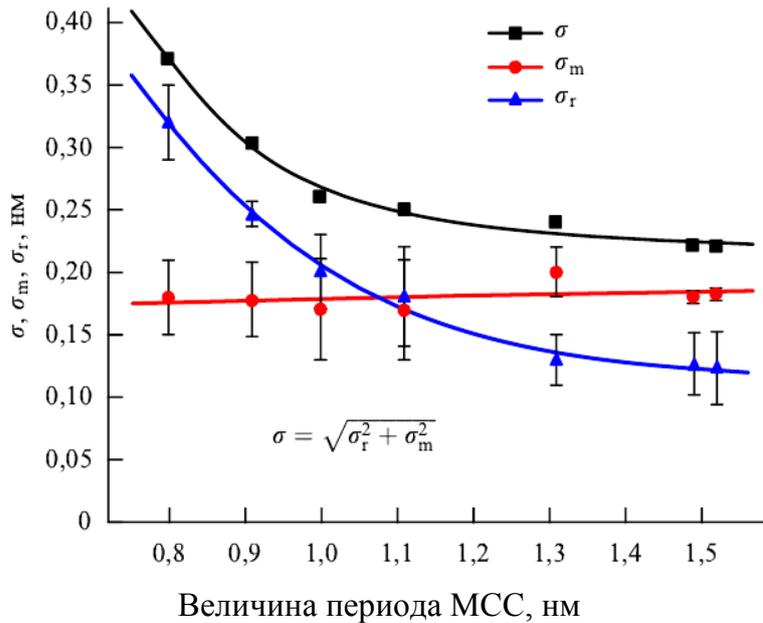
Расчетные (линии с символами) и экспериментально полученные (звездочки) коэффициенты отражения наиболее перспективных многослойных зеркал нормального падения

На рисунке приведены расчетные и экспериментально полученные коэффициенты отражения ряда наиболее перспективных МСС в диапазоне длин волн 2.3 – 20 нм, характеризующие современное состояние дел в технологии синтеза зеркал нормального падения для МР и ЭУФ диапазонов. Для коротковолновой границы рассматриваемого диапазона, $\lambda=2.3$ нм, экспериментально полученные коэффициенты отражения многослойных зеркал не превышают 1%, что существенно отличается от расчетов для идеальных структур с нулевыми межплоскостными шероховатостями. Тем не менее, достигнутые коэффициенты отражения зеркал уже сейчас позволяют применять их, по крайней мере, в ЭУФ диапазоне. Однако необходимо учитывать, что оптические системы с высоким пространственным разрешением обычно включают не менее двух элементов, а зачастую и больше, и их эффективность резко падает, даже при незначительном уменьшении коэффициентов отражения отдельных зеркал. В коротковолновой области коэффициенты отражения зеркал в разы меньше теоретического предела. Поэтому ключевая проблема многослойной рентгеновской оптики связана с повышением отражательной способности МСС.

На отражательные характеристики короткопериодных МСС особенно сильное влияние оказывает размытие межслоевых границ, σ . Френелевский коэффициент отражения для “неидеальной” границы в брэгговском резонансе можно записать в виде $r_F \cong r_{Fid} \cdot \exp(-2\pi^2\sigma^2/d^2)$, где r_{Fid} - коэффициент отражения от идеальной границы, d – период структуры. Наличие межплоскостных переходных границ приводит к увеличению длины экстинкции рентгеновского излучения в МСС и, как следствие, к увеличению числа отражающих слоев, сужению спектральной полосы отражения и, соответственно, к дополнительному снижению интегральных коэффициентов отражения. Межслоевые области в МСС формируются как истинно геометрическими шероховатостями границ раздела слоев, так и за счет диффузионного и химического взаимодействия материалов слоев. В свою очередь геометрические шероховатости определяются как исходными шероховатостями подложек, так и ростовыми шероховатостями, которые зависят и от материалов слоев, и от технологии нанесения МСС.

Таким образом, повышение коэффициентов отражения МСС и продвижение в коротковолновую область тесно связано с проблемой качества “интерфейсов”. Для решения этой проблемы необходимо развивать технологические процессы роста МСС с максимально резкими границами раздела слоев. Параллельно требуется развивать методы диагностики, позволяющие изучать тонкую структуру переходных слоев и выделять вклады перемешивания материалов слоев и истинно геометрических шероховатостей, изучать корреляции межслоевых шероховатостей и шероховатостей подложки во всем диапазоне пространственных частот, определяющих коэффициенты отражения и изображающие свойства МСС.

В этой связи можно отметить нашу работу, где на основе анализа угловых зависимостей зеркального и диффузного рассеяния жесткого рентгеновского излучения удалось разделить вклады диффузионного перемешивания и межслоевой шероховатости короткопериодных W/B_4C МСС. Несмотря на то, что примененная методика “работает” только при анализе МСС с полностью продольно коррелированными границами слоев, она позволила получить ряд интересных физических результатов.



Зависимости длины переходной области σ , межслойной шероховатости σ_r и глубины перемешанного слоя σ_m от величины периода для серии W/B_4C зеркал.

На рисунке приведены измеренные зависимости полной ширины переходной зоны σ , межслойной шероховатости σ_r и глубины перемешивания σ_m от периода структуры для серии МСС. Из полученных зависимостей видно следующее. Во-первых, как и ожидалось, глубина перемешивания, определяемая процессами взаимодиффузии и “баллистическим” перемешиванием материалов на границах (в потоке конденсата присутствуют атомы и ионы с энергией более 10 эВ) практически не зависит от величины периода МСС. Во-вторых, шероховатость σ_r слабо меняется при больших периодах и начинает резко возрастать с периодов $d \approx 1.1 \div 1.2$ нм. Наиболее вероятно объяснение такой динамики шероховатости связано с нарушением сплошности слоев, когда их средняя толщина соответствует 0.4-0.6 нм. В-третьих, для МСС с периодами $d > 1.1$ нм большой вклад в ширину переходной зоны дает перемешивание материалов слоев, в основном определяемое энергетикой и химическим составом конденсата, а не геометрическая шероховатость, как предполагалось ранее. В целом проведенные исследования показали, что W/B_4C короткопериодные структуры обладают совершенными границами. Подобными свойствами обладают так же W/Si МСС с периодами $d > 2$ нм. Данные исследования позволили заметно продвинуться в область меньших периодов МСС.

Еще одна важная особенность МСС из сверхтонких пленок связана с тем, что в силу различия физико-химических свойств материалов, параметры гетерограниц в элементарной ячейке могут существенно различаться. Во многих МСС, применяемых в качестве элементов рентгенооптики, асимметрия границ раздела слоев невелика, и применение развитых методов диагностики МСС с симметричными границами не приводит к значительным ошибкам при определении индивидуальных толщин и плотностей пленок, эффективной межслойной шероховатости. Однако в ряде случаев асимметрией границ раздела слоев нельзя пренебречь. В частности, таким примером могут служить МСС, на основе которых или уже строится многослойная оптика для станков проекционной нанолитографии, это зеркала на основе *Mo/Si* для литографов на длину волны 13.5 нм, или *La/B₄C* для зеркал на спектральную область около 6.7 нм, перспективную для следующего поколения нанолитографов. Как в насмешку, именно для этих МСС наблюдается настолько яркая асимметрия электронной плотности на границах раздела слоев, что стандартные методы диагностики не позволяют, опираясь на данные рефлектометрии, адекватно описать строение МСС и предсказать коэффициенты отражения зеркал в различных диапазонах рентгеновского излучения.

Адекватная методика рентгеновской диагностики МСС с несимметричными границами раздела была разработана *М.М. Барышевой*. Это позволило подтвердить методами неразрушающей диагностики не симметрию интерфейса в *Mo/Si* МСС и объяснить причину недостаточно высокой отражательной способности *La/B₄C* МСС в МР диапазоне, наблюдаемой практически всеми, кто занимался многослойной оптикой на основе этой пары материалов. Выяснилось, что основная причина заключается в аномально высоком химическом и диффузионном взаимодействии лантана и бора. Развитие диагностики МСС с несимметричными межслойными границами оказалось практически полезным и для развития технологии нанесения МСС, и для поиска супертонких барьерных слоев, препятствующих взаимодействию лантана и бора.

С развитием работ по рентгеновской литографии в последние 2-3 года выделилось новое направление – создание эффективной многослойной оптики для

спектральной области $\lambda \approx 6.7$ нм, в которой по оценкам можно получить разрешение литографа до 8 нм. В разработке технологии нанесения МСС для спектральной области 6.7 нм основное участие принимают молодые сотрудники **В.Н. Полковников** и **С.Д. Стариков**. Это сложная и важная проблема и хочется надеяться, что при ее решении сотрудники профессионально вырастут, а мы будем гордиться полученными результатами.

Расчетный пиковый коэффициент отражения до 80% в этой области имеют МСС на основе La/B , правда, при спектральной ширине кривой отражения 0.5-0.6 нм, т.е. интегральный коэффициент отражения не очень то и велик. Увеличить интегральный коэффициент отражения до 2 раз можно, применяя пару материалов U/B , но это на сегодняшний день совсем фантастика. Из-за чрезвычайно низкой скорости распыления мишени бора методом магнетронного распыления в экспериментах чистый бор заменяется на его карбиды, B_4C или B_9C , хотя при этом даже расчетный пиковый коэффициент отражения едва достигает 70%. Однако реально полученные пиковые коэффициенты отражения для La/B_4C - зеркал нормального падения (толщина периода 3.4-3.5 нм при числе периодов 130-150) далеко не дотягивают до теоретического предела и в большинстве работ не превышают 45-47%. Разработка литографа на основе зеркал с такими коэффициентами отражения, когда число зеркал может быть больше десяти, просто не выгодно. На сегодняшний день понятно, что основные причины недостаточной отражательной способности зеркал связаны с размытием переходных границ между слоями лантана и бора вследствие процессов взаимной диффузии и образования их химических соединений, а также вследствие отличия плотности слоев лантана от табличных значений (80-90% от плотности массивного La).

Для уменьшения влияния взаимной диффузии материалов слоев применяются, так называемые, антидиффузионные слои, желательны прозрачные на рабочей длине волны излучения. Поиск материалов для антидиффузионных слоев долго не давал кардинальных успехов, увеличение пикового отражения на единицы процентов мало радует, хотя и это как-то идет в нашу “копилку”. Только в последнее время эксперименты с углеродными барьерными слоями позволили выйти практически на уровень 60% коэффициентов отражения для зеркал нормального падения.

Не ограничиваясь оптимизацией антидиффузионных слоев, мы параллельно рассматриваем несколько дополнительных возможностей повышения отражательной способности многослойных зеркал, в частности La/B_4C . Например, чтобы уменьшить эффекты перемешивания материалов слоев, предлагается реализовать возможность “уплотнения” поверхности каждого свеженанесенного слоя путем “полировки” низкоэнергетичными ионами так, чтобы убирать верхнюю часть слоя с пониженной плотностью. Для распыления мишеней из чистого бора, как и из любых других мишеней из легких материалов, можно применить технологию ионно-пучкового распыления. В новом технологическом стенде, который обсуждался выше, предусмотрена возможность в едином технологическом цикле одновременного распыления мишеней магнетронным и ионно-пучковым распылением.

Можно отметить, что хотя еще имеется ряд проблем как в диагностике, так и в технологии нанесения МСС для эффективных зеркал нормального падения, уже сейчас с их помощью решается большинство перечисленных выше задач, по крайней мере, в области длин волн $\lambda > 3$ нм. Короткопериодные зеркала с периодом $d \sim 1-2$ нм представляют большой интерес для применений в качестве поляризаторов и фазовращателей рентгеновского излучения, элементов высокоразрешающих микроскопов в диапазоне “окна прозрачности воды” ($\lambda = 2.3-4.5$ нм), фокусирующих и коллимирующих зеркал для жесткого рентгеновского диапазона. Особенности короткопериодных МСС связаны с большим числом синфазно отражающих слоев (до 10^3 и более), минимальная толщина которых может достигать 0.3-0.4 нм, и с тем, что их отражательная способность чрезвычайно чувствительна к качеству межслоевых границ. В наших работах была оптимизирована технология нанесения и развиты методы диагностики короткопериодных МСС, изучены механизмы формирования межслоевых границ. Основным результатом этих исследований стала разработка технологии нанесения МСС с периодами 1-2 нм с коэффициентами отражения при нормальных углах падения в диапазоне мягкого рентгеновского излучения на уровне 10-20%. Большая часть полученных коэффициентов отражения зеркал или были, или до сих пор остаются рекордными.

Практически в отдельное научно-технологическое направление в области развития многослойной рентгеновской оптики переходят исследования, связанные или с разработкой *свободновисящих пленочных структур*, или с переносом пленочных структур на новые подложки, которые функционально больше подходят для проведения конкретных экспериментов или применений. Это направление в настоящее время “набирает обороты” и, как мы надеемся, скоро может занять достойное место среди других направлений рентгенооптики. Началом таких исследований у нас можно считать уже давнее изготовление эпитаксиальных сверхтонких пленок полупроводников для изучения эффектов размерного квантования экситонов. Работа выполнялась совместно с группой **В.С. Багаева** (ФИАН) по инициативе **Л.В. Келдыша**. Тогда пленки полупроводников наносились на подложки щелочно-галлоидных кристаллов и затем, чтобы они не рвались из-за разницы в ТКЛР при криогенных исследованиях, переносились на подложки MgF_2 . Результаты были получены, опубликованы, а технологию отложили до лучших времен, когда еще понадобится.

Технология съема многослойных структур с исходной подложки и переноса их на новые держатели понадобилась уже в работах по многослойной рентгеновской оптике. Например, в первых наших работах по пленочным поляризаторам для рентгеновского диапазона многослойные зеркала наносили на тонкие (≈ 100 нм) Si_3N_4 мембраны. Типичная среднеквадратичная шероховатость поверхности таких мембран обычно составляет $\sigma \approx 0.6$ нм, что определяется высокотемпературной технологией их изготовления. Это недопустимо большая шероховатость для многослойных структур с периодом 2-3 нм, при этом мембраны и сами вносят поглощение излучения. По этим причинам была, основываясь на старом опыте, разработана методика изготовления свободновисящих зеркал (*без опорной мембраны*). При этом удалось существенно уменьшить межплоскостные неровности до $\sigma \approx 0.3-0.4$ нм.

Были изготовлены и испытаны на синхротронах образцы поляризаторов с диаметром рабочей зоны до 10 мм. Экспериментально на синхротронах SPRING-8 и BESSY-2 показано, что на основе Cr/Sc МСС изготовлены четвертьволновые пластинки на длинах волн 3.1-3.3 нм и 4.3-4.47 нм. В этих работах кроме технологов, **С.С. Андреева** и **К.А. Прохорова**, которые наносили многослойные

структуры для поляризаторов, а их качество должно быть существенно выше, чем для типичных зеркал, работающих на отражение, большую роль в изготовлении свободновисящих пленок для поляризаторов сыграли *В.И. Лучин* и *А.Я. Лопатин*. Особенно хочется отметить большую роль *А.Я. Лопатина* в развитии лабораторной технологии изготовления всех свободновисящих пленочных структур, в том числе описанных ниже.

Впрямую технология переноса пленочных структур на новые подложки понадобилась при разработке методики нанесения многослойных структур на изогнутые подложки слюды. Дело в том, что тонкую слюду легко можно изгибать, с радиусом кривизны в единицы сантиметров. Поэтому уже давно изогнутые кристаллы слюды применяются в качестве фокусирующих дисперсионных элементов с высоким спектральным разрешением для диагностики высокотемпературной плазмы. Однако межплоскостное расстояние слюды, как слоистого кристалла, около 1 нм. Поэтому спектральный диапазон работы такого дисперсионного элемента физически ограничен длиной волны не больше 2 нм.

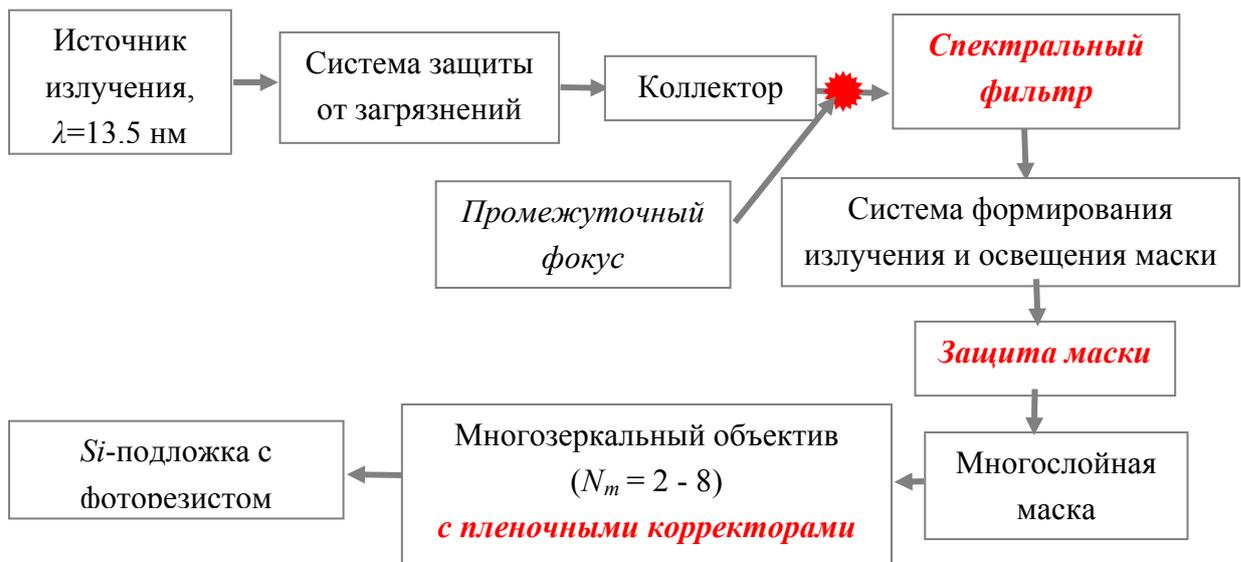
В принципе можно, так мы и думали сначала, нанести многослойное зеркало на слюду, а затем, изогнув ее по заданному радиусу, получить новый фокусирующий дисперсионный элемент, спектральный диапазон работы которого теперь определяется свойствами искусственного многослойного зеркала и может быть существенно расширен по сравнению с любыми естественными кристаллами. Но оказалось, что из-за внутренних механических напряжений многослойное покрытие или отрывается от поверхности слюды, забирая с собой последний слой слоистого кристалла, или тоже происходит при изгибе кристалла после нанесения многослойной структуры.

Проблема разрешилась путем переноса многослойного покрытия с подложки, на которую наносилось МСС, на поверхность слюды. Сцепление такой перенесенной МСС с поверхностью слюды оказалось таким, что можно было слюду изгибать до малых радиусов кривизны. Это позволило решить проблему изготовления фокусирующих, светосильных, дисперсионных элементов рентгеновского диапазона. В частности многослойные дисперсионные элементы на основе W/B_4C и Cr/Sc , перенесенные на слюду, изогнутую по цилиндру с радиусом кривизны 20 мм, были применены в спектрометре Гамоша для рентгеновской

диагностики лазерной плазмы. Исследования в области развития технологии изготовления изогнутых дисперсионных элементов большой апертуры и их применений для диагностики плазмы были проведены по инициативе и совместно с сотрудником ФИАНа *А.П. Шевелько*.

Таким образом, была развита лабораторная технология изготовления свободновисящих МСС, которые применяются в качестве зеркал поляризаторов, фазосдвигающих и делительных пластинок, дисперсионных элементов.

Свободновисящие многослойные пленочные структуры нерезонансного типа (как правило, в них именно “многослойность” необходима не для каких-то резонансных отражения или пропускания, а только для прочности пленки, хотя иногда используется сочетание резонансного отражения излучения в наперед заданном спектральном участке и нерезонансного поглощения) нашли применение в качестве абсорбционных спектральных фильтров для рентгеновской диагностики лабораторной и космической плазмы. Оказалось, что такие свободновисящие пленки необходимы в стендах проекционной литографии на длине волны 13.5 нм. В частности, это абсорбционные спектральные фильтры, пленки для защиты масок от загрязнений, корректоры aberrаций объектива, места которых в схеме сканера показаны на рисунке.



Типичная схема сканера с оптическими элементами на основе свободновисящих пленочных структур, показанных красным цветом.

Первыми после промежуточного фокуса в схеме находятся спектральные фильтры. Их необходимость связана с тем, что для любого типа источников излучения коэффициент конверсии энергии возбуждения в энергию “полезного” излучения с длиной волны $\lambda=13.5$ нм и спектральной шириной, определяемой применяемой многозеркальной оптической системой, $\Delta\lambda/\lambda\approx\pm 1\%$, как правило, не превышает 1%, и в перспективе может достигать единицы процентов. Остальная энергия возбуждения в основном высвечивается в виде более длинноволнового фонового излучения, которое может негативно влиять и на элементы оптической схемы, и на процесс экспонирования фоторезиста, а поэтому должно быть отфильтровано от полезного излучения.

В настоящее время в случае высокопроизводительных сканеров применяются лазерно-плазменные источники излучения ($\lambda=13.5$ нм) на базе импульсных CO_2 лазеров с высокой, до десятков киловатт, средней мощностью излучения с длиной волны 10.6 мкм. Это излучение в свою очередь эффективно рассеивается на плазме и также превращается в фоновое излучение, сравнимое или даже превышающее по мощности фоновое излучение плазмы. Все паразитное фоновое излучение необходимо отфильтровать от полезного излучения. По этим причинам спектральные фильтры, применяемые в сканерах, должны удовлетворять ряду специфических требований. В частности, фильтр должен пропускать 70-80% излучения с $\lambda=13.5$ нм и не более 1% остального фонового излучения. Эти условия можно удовлетворить при толщине фильтра $\approx 40-50$ нм.

При диаметре фильтра 160-200 мм суммарная плотность мощности поглощенного излучения в фильтре достигает 4-8 Вт/см². При таких толщинах пленки фильтр охлаждается только за счет собственного теплового излучения, а температура пленки может достигать 1000°C. При этом дополнительное требование к фильтрам - обеспечить защиту элементов схемы от бомбардировки корпускулярными частицами различной природы образования.

Сопутствующие требования к спектральным фильтрам связаны с особенностями технологического процесса экспонирования фоторезиста в сканере и условиями работы сканера. Так к важным особенностям относится экспонирование пачкой импульсов излучения, при частоте повторения пачки ≈ 3 Гц (скважность пачки импульсов излучения равна 1.5) и частоте импульсов излучения

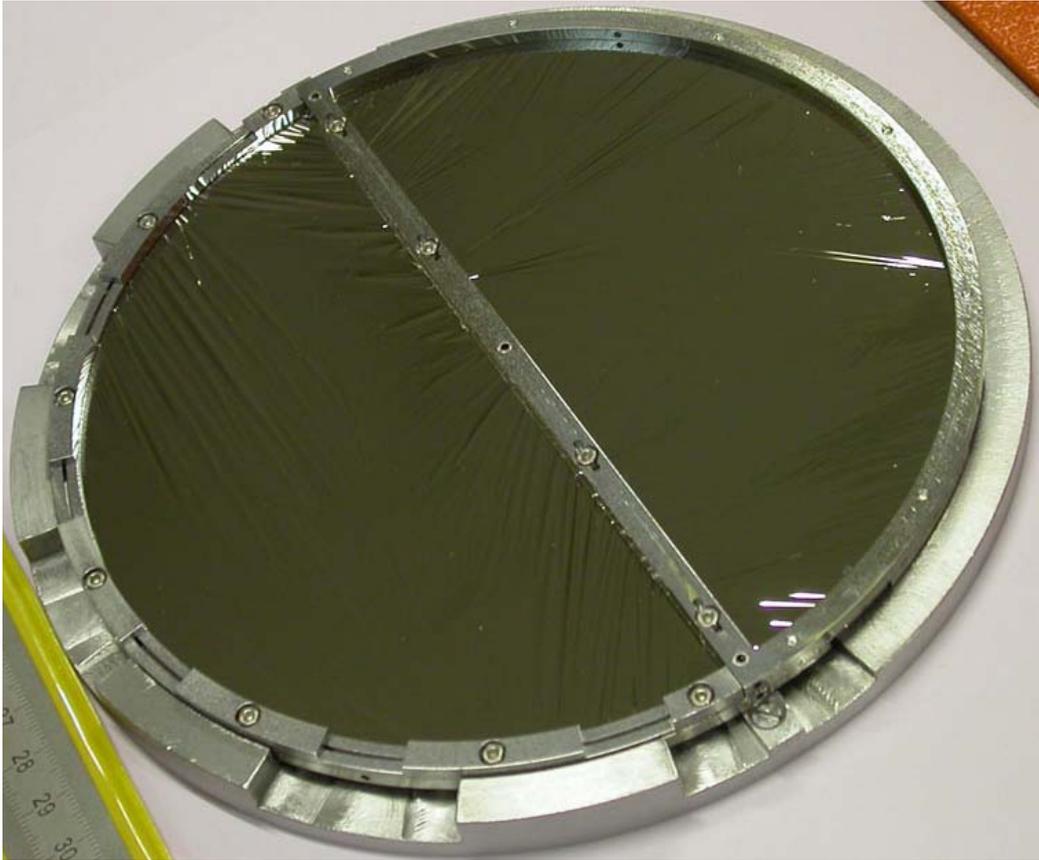
единицы килогерц, а в перспективе и до ~ 50 кГц. И желательно, чтобы этот процесс стабильно продолжался без смены фильтра в течение хотя бы нескольких тысяч часов. В сканере принципиально имеется технологическая водородная среда и, конечно, присутствуют остаточные газы - вода, кислород, углеродные соединения. Все это сказывается на долговременной эксплуатации фильтра при пульсирующей высокой температуре.



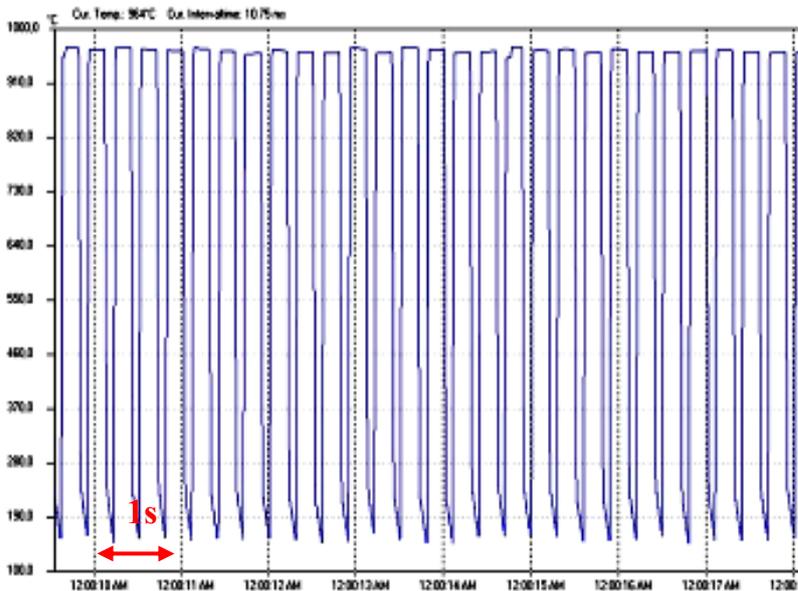
Первый спектральный фильтр на основе Zr/Si (с размерами 140×20 мм² при толщине 53 нм), разработанный специально для сканера ADM компании ASML. Фильтр сохранял долговременную работоспособность при поглощенной мощности излучения до ≈ 1 Вт/см².

В дальнейшем требования к спектральным фильтрам быстро и кардинально изменились. Теперь фильтр должен выдерживать, хотя бы в перспективе, поглощенную мощность излучения до 10 Вт/см² и служить защитой элементов схемы от бомбардировки корпускулярными частицами с микронными и субмикронными размерами. Существенно вырос и диаметр рабочей зоны фильтра, до $D=160$ мм. На поверхностях фильтра при общей толщине пленки ≈ 55 нм появились покрытия $MoSi_2$, предохраняющие от окисления пленки даже при высоких температурах.

Вследствие импульсного режима экспонирования спектрального фильтра проявляется и соответствующая временная зависимость его температуры. Типичная временная зависимость температуры в процессе экспонирования при лабораторных испытаниях показана на рисунке. Максимальная температура фильтра при наличии излучения равна $T_{max}=964^\circ\text{C}$, а в паузе, когда излучение отсутствует, фильтр охлаждается за счет собственного теплового излучения и температура опускается до $T_{min} \approx 175^\circ\text{C}$.



Фотография свободновисящего спектрального фильтра для применений в условиях, когда поглощенная мощность излучения может достигать 5 Вт/см^2 . Диаметр рабочей зоны $D=160 \text{ мм}$, толщина пленки 55 нм .



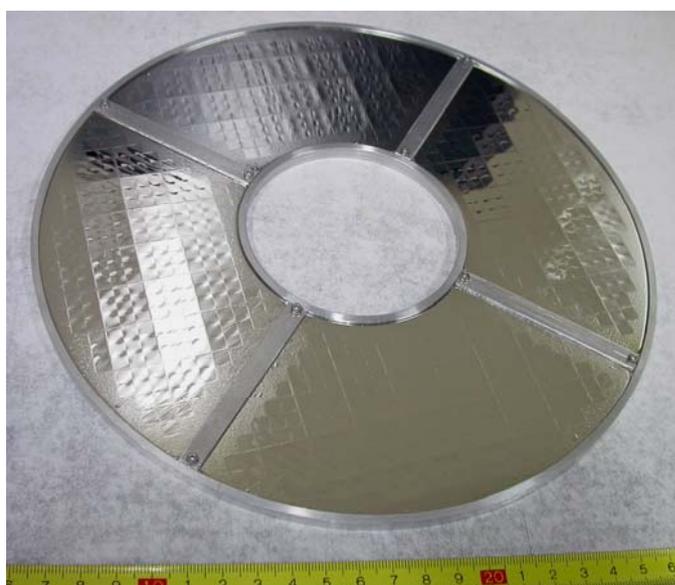
Типичная временная зависимость температуры спектрального фильтра в процессе экспонирования при лабораторных испытаниях.

$T_{\max}=964^{\circ}\text{C}$; $T_{\min}\approx 175^{\circ}\text{C}$;
частота повторения экспонирования $F=3.3 \text{ Гц}$.

Состав фильтра:
 $\text{MoSi}_2(3.5 \text{ нм})$, $[\text{Zr}(2.8 \text{ нм})/\text{ZrSi}_2(1.2 \text{ нм})] \times 15$,
 $\text{Zr}(2.8 \text{ нм})$, $\text{MoSi}_2(3.5 \text{ нм})$

В последнее время требования и к спектральным фильтрам для космических исследований настолько выросли, что практически сравнялись с требованиями на подобные элементы для стандов коротковолновой проекционной нанолитографии.

Особенности требований к космическим фильтрам обусловлены яркостью Солнца практически во всех спектральных диапазонах и, как следствие, необходимостью надежного подавления фонового излучения, и повышенной прочностью пленок. Фильтры должны выдержать сложные условия запуска ракеты, связанные с вибрацией, акустикой, ускорением. При этом рабочая апертура отдельных элементов фильтра достигает 170 мм. Решение технологических проблем изготовления фильтров для космических применений в основном легло на плечи *А.Я. Лопатина* и *Н.Н. Цыбина*. В результате и эти задачи были успешно решены, на фотографии показан фильтр (весь фильтр складывается из четырех равных частей) на основе *Al-Si*, предназначенный для работы телескопа на длинах волн 17.1 и 30.4 нм.



Фотографии многослойного Al/Si фильтра на диапазон длин волн 17-35 нм для солнечного телескопа и его создатели – Н.Н. Цыбин, В.И. Лучин и А.Я. Лопатин.

Второй элемент на основе свободновисящей пленки в схеме литографа служит для защиты многослойной маски от загрязнений частицами размером больше 30 нм. Такие частицы всегда, хотя и в очень малых количествах, могут появляться в камере. Защитная пленка находится вблизи, на расстоянии около 1 мм, от маски и просто загораживает маску от налетающих частиц. В такой схеме излучение должно два раза пройти через защитную пленку, чтобы попасть в объектив, а суммарную прозрачность после двух пробогов желательно иметь не меньше 70%. Вся поглощенная в пленке мощность излучения пойдет на ее нагрев, который

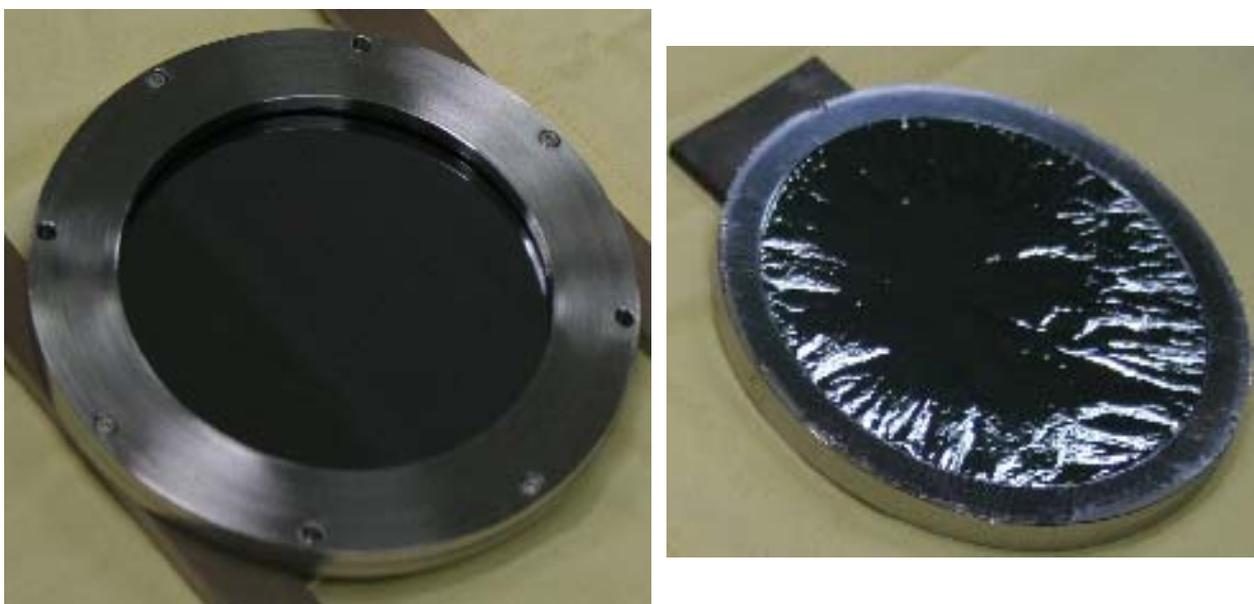
также желательно минимизировать. Поэтому прозрачность такой пленки должна быть не меньше 85%, что может быть реализовано при толщине защитной пленки 20-25 нм. Для постановки в сканер диаметр защитной пленки с формой круга должен быть ≈ 170 мм. В настоящее время для проведения предварительных экспериментов развита лабораторная технология и изготовлены свободновисящие многослойные пленки с внутренним (рабочим) диаметром 80 мм. При толщине пленки 25 нм прозрачность на длине волны 13.5 нм равна 84%.

Пленка в сканере засвечивается излучением построчно через диафрагму с формой “банана” с размерами $\approx 140 \times 10$ мм² до полного экспонирования чипа. Таким образом, при работе сканера предполагается принципиально неоднородный нагрев свободновисящей пленки и это необходимо учитывать для предотвращения провисания пленки и ее контакта с диафрагмой. Плотность поглощенной мощности излучения в пленке может составлять до 5 Вт/см², соответственно температура пленки - до 800-900°C. В остальных условиях эксплуатации защитной пленки не отличаются от условий для спектрального фильтра. Важным параметром защитных пленок является время жизни, которое в лучшем случае (*если пленка не разрушится, что можно считать катастрофой*) определяется возможными загрязнениями ее во время работы в камере сканера. Поэтому, по-видимому, хорошо бы придумать способы ее очистки, чтобы восстанавливать и продлить срок службы пленки. Но это дело будущего.

Был определен предварительный состав пленки с прозрачностью $\approx 85\%$ на длине волны 13.5 нм, разработана лабораторная технология изготовления свободновисящих защитных пленок теперь уже толщиной 20-25 нм. Пока ограничили диаметр образцов 80 мм, т.к. нужно определиться с требованиями к качеству пленок, когда они применяются в реальных условиях на действующем сканере. С этой целью развиты технологии изготовления как просто свободновисящих пленок (это технологически проще и дешевле), которые всегда имеют морщины (характеристики морщин определяются конкретными технологическими приемами), и натянутую пленку, у которой практически отсутствуют морщины. На следующем этапе предполагается проведение испытаний защитных пленок на живучесть в реальных эксплуатационных

условиях, необходима проверка, не ухудшает ли пленка (и какая – просто свободновисящая или натянутая) пространственное разрешение сканера.

Третий тип свободновисящих пленок – пленочные корректоры фазовых и амплитудных aberrаций объектива сканера. При коренных отличиях функциональных свойств корректоров от выше рассмотренных свободновисящих элементов схемы технология их изготовления имеет много общего. На фотографии показаны свободновисящие пленки с рабочим диаметром 80 мм, включая образец натянутой пленки, для корректоров aberrаций. На таких образцах в настоящее время отрабатываются операции корректировки aberrаций объектива литографа.



Фотографии свободновисящих пленок с рабочим диаметром 80 мм для корректоров aberrаций объектива; слева показан образец натянутой пленки.

Многочисленные испытания свободновисящих пленочных структур, разрабатываемых в ИФМ для стандов проекционной литографии, в значительной мере проводит **Л.А. Шмаенок**, который хотя и является в настоящее время российско-голландским научным работником и формально никогда не был сотрудником ИФМ РАН, но за последние тридцать лет разносторонней совместной работы в области применений элементов многослойной рентгеновской оптики фактически давно стал настоящим сотрудником нашего отдела. Мы так его и рассматриваем. В исследованиях образцов до и после испытаний методом вторичной ионной масс-спектрографии активное участие принимает **М.Н. Дроздов**.

В заключение можно отметить, что относительно “свежее” направление – свободновисящие пленочные структуры – претерпевает “бурное” развитие. Они представляют интерес и как свободновисящие многослойные зеркала, и как нерезонансные пленочные структуры, применение которых было описано выше. Можно отметить, что в последнее время появилось еще одно применение свободновисящих пленок из материалов, содержащих водород (например, пленки полимеров) или углерод, связанное с разработкой лазерно-плазменных источников протонов. Можно надеяться, что и в этом направлении свободновисящие структуры будут полезны.

К наиболее значимым результатам этого раздела можно отнести следующие:

- Изучены корреляционные свойства межслоевых шероховатостей в многослойных структурах, что, в частности, впервые позволило разделить вклады диффузионного перемешивания пленок и геометрических шероховатостей границ в суммарную глубину переходного слоя.
- Определены пары материалов и технологические режимы, при которых отдельные слои сохраняют сплошность вплоть до толщины 0.3-0.4 нм. Эти пары материалы явились основой для создания высокоотражающих короткопериодных зеркал.
- Короткопериодные многослойные зеркала применены в ряде экспериментов с лазерно-плазменными и синхротронными источниками излучения в качестве дисперсионных элементов со спектральным разрешением до $\lambda/\delta\lambda \approx 500$ в спектральном диапазоне 1-3 нм, поляризаторов и фазовращателей излучения в диапазоне 1-4.5 нм.
- Синтезированы и изучены различные короткопериодные МСС, которые нашли применение в физических экспериментах и в научном приборостроении в различных научных лабораториях и промышленных компаниях мира. В частности, на основе короткопериодных дисперсионных элементов был разработан совместно с сотрудниками ФТИ АН (*Л.А.Шмаёнок, С.В.Бобаев*) 10-канальный полихроматор с наносекундным временным разрешением для диагностики в мягком рентгеновском диапазоне горячей плазмы на установке с взрывным лайнером АНГАРА-5-1 в ФИАЭ им. И.В. Курчатова, а

- Разработана лабораторная технология изготовления свободновисящих пленочных структур, которые применяются в качестве многослойных зеркал поляризаторов, фазосдвигающих и делительных пластинок, дисперсионных элементов, в качестве абсорбционные спектральных фильтров, пленок для защиты масок от загрязнений и корректоров aberrаций объектива в стендах проекционной нанолитографии, для рентгеновской диагностики лабораторной и космической плазмы.



Они придумывают, разрабатывают технологию изготовления, изготавливают и испытывают свободновисящие элементы рентгеновской оптики.

*Слева – направо: Н.Н. Цыбин, А.Я. Лопатин, Е.Б. Ключенков, Б.А. Володин,
Л.А. Шмаенок, Н.Н. Салащенко, В.И. Лучин.*

4. Прецизионная многослойная “рентгеновская” оптика

Основными факторами, долгое время сдерживавшими развитие прецизионной изображающей оптики МР и ЭУФ диапазонов, являлись трудновыполнимые требования к качеству поверхностей зеркал и абберациям объективов в целом. Для достижения дифракционного качества изображений, когда пространственное разрешение ограничивается только длиной волны излучения, в этом диапазоне шероховатость границ раздела слоев в МСС и, соответственно, шероховатости поверхностей подложек для зеркал должны быть на атомарном уровне (меньше 0.3 нм). Точность формы поверхностей, зачастую асферических, по параметру среднеквадратического отклонения (*RMS*) в зависимости от спектрального диапазона лежит в пределах $\approx 0.2-1$ нм.

Для решения этой проблемы необходимо было решить две задачи. Первая – это развитие адекватных методов изучения шероховатости и формы поверхности, второе – развитие методов коррекции (исправления) формы подложек до заданной.

Возросшие на 1-2 порядка требования к качеству поверхностей потребовали ревизии реальных возможностей существующих методов применяемых в оптической промышленности. В частности, оказалось, что традиционные интерферометрические методы контроля формы оптических поверхностей, в которых в качестве эталонного используется волновой фронт, образованный при отражении от эталонной поверхности, обладают высокой ($\lambda/1000$ и выше) чувствительностью к изменениям формы волновых фронтов, однако при этом абсолютная точность измерений не превышает $\lambda/20-\lambda/50$, где λ – рабочая длина волны интерферометра. Это связано как с качеством формы эталонной поверхности, так и с особенностями конструкции интерферометров, в которых световые пучки проходят через ряд оптических элементов, неконтролируемо набирая дополнительные набег фаз.

В полной мере эти проблемы проявились и при измерении шероховатости сверхгладких поверхностей. Практика показала, что для изучения свойств сверхгладких и сверхточных поверхностей необходимо отказаться от традиционной калибровки приборов с помощью различных эталонов, а развивать

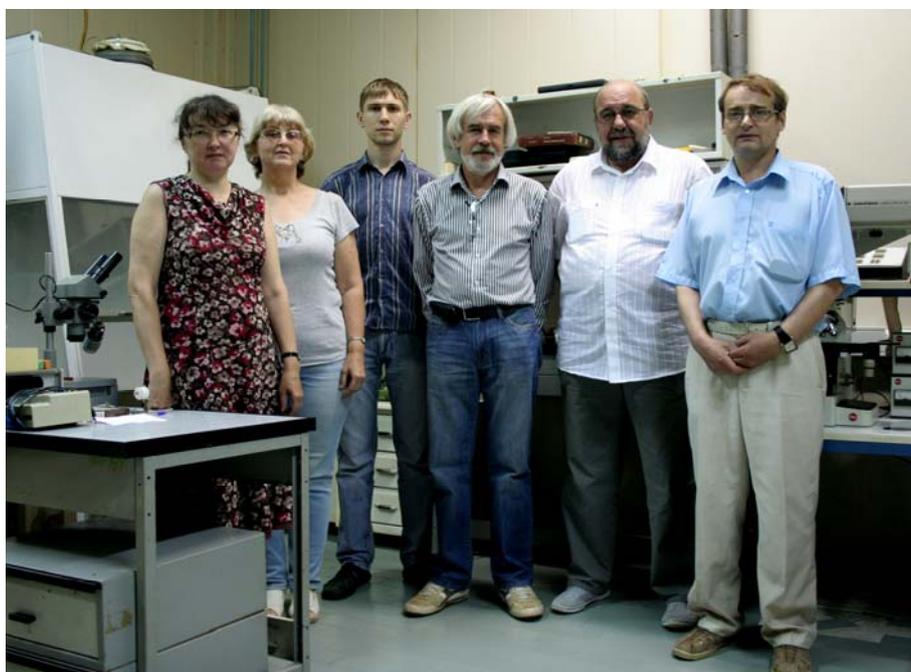
“первопринципные” методы, работающие на основе фундаментальных физических законов, когда основные характеристики прибора (метода) могут быть измерены в физически прозрачном эксперименте с возможностью провести достоверную оценку погрешностей измерений. Следуя этой идеологии, в ИФМ был создан комплекс методик, включающий анализ угловых зависимостей диффузного и зеркального отражения мягкого и жесткого рентгеновского излучения, а так же атомно-силовую микроскопию, позволяющий с достоверностью измерять шероховатости поверхностей с практически любыми габаритными размерами и формой.



В разработке комплекса методик измерений шероховатостей супергладких поверхностей с практически любыми габаритными размерами и формой активное участие принимают М.М. Барышева и М.В. Зорина, Б.А. Грибков и Ю.А. Вайнер.

Для аттестации формы поверхностей и aberrаций оптических систем таким методом стала **интерферометрия с дифракционной волной сравнения**, предложенная в 1933 В.П. Линником. Основа метода заключается в формировании эталонной сферической волны в результате дифракции света на малой апертуре. Решение классической задачи дифракции света на отверстии в экране с бесконечной проводимостью и нулевой толщиной показывают, что в пределах дифракционного максимума, угловая ширина которого составляет $\approx \pm \lambda/d$, d – диаметр отверстия, фазовая поверхность волны представляет собой “идеальную” сферу.

В настоящее время в мире насчитывается около десятка подобных интерферометров с рабочими длинами волн 633, 530 и 13.5 нм. Однако пока они не нашли широкого распространения ввиду сложности юстировки и неконтролируемого влияния aberrаций первичной оптики на качество фронта дифрагированной волны. Наряду с техническими сложностями нами было показано наличие ряда физических эффектов, отрицательно влияющих на качество фронта дифракционной волны, приводящим к тому, что декларируемые aberrации эталонной волны на уровне 0.1 нм обеспечиваются в относительно малых, порядка $NA \approx 0.1$, числовых апертурах.

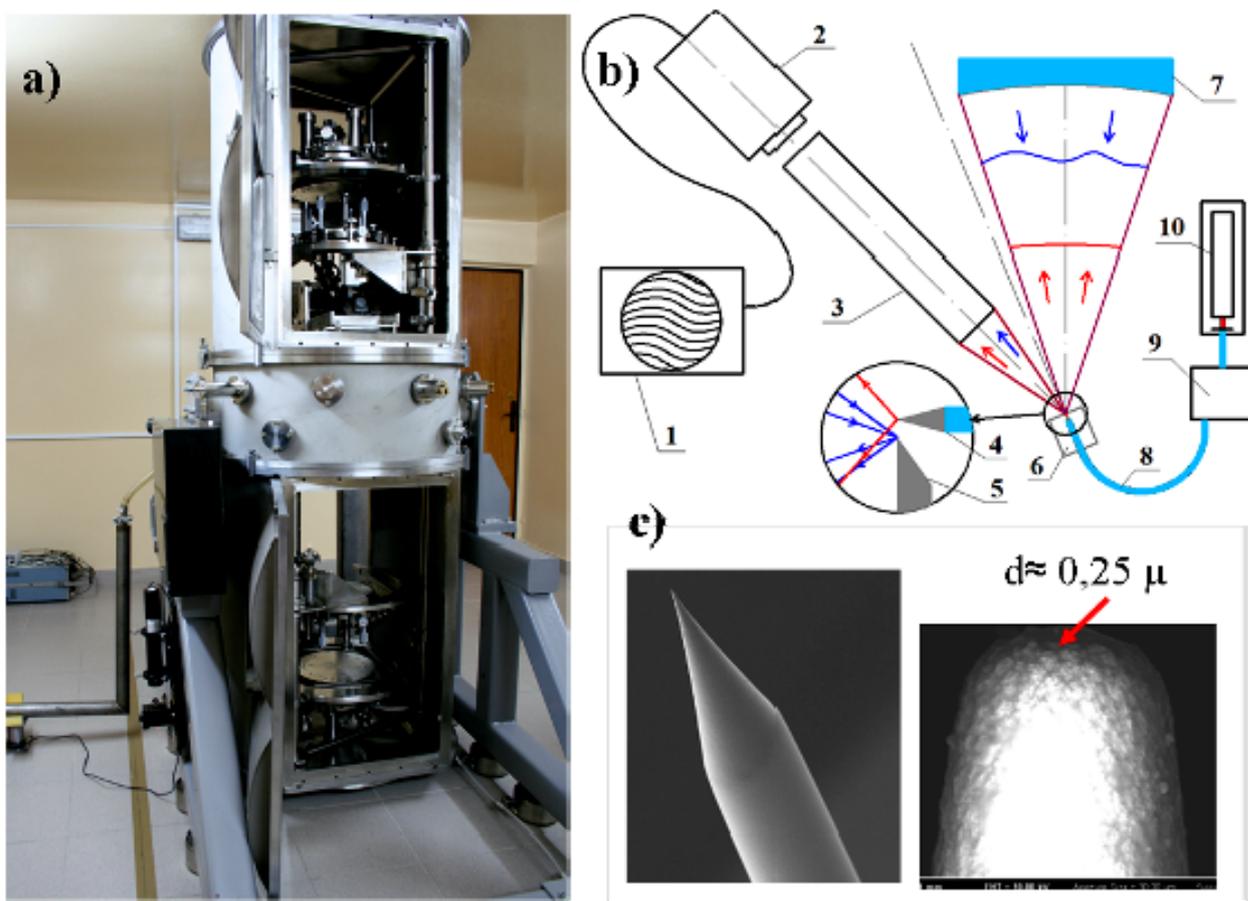


Разработчики технологии изготовления источников сферической волны на основе одномодового оптического волокна с субволновой выходной апертурой:

Е.Д. Чхало, Л.В. Клименко, М.Н. Торопов, В.В. Рогов, А.Ю. Климов, Н.И. Чхало.

Существенный скачок в точности измерений интерферометров с дифракционной волной сравнения был сделан благодаря разработке в нашем институте в 2008 г. **источника эталонной сферической волны на основе одномодового оптического волокна с субволновой выходной апертурой**. Его появление стало возможным благодаря сложению ряда наработок в области метрологии aberrаций волновых фронтов и в изготовлении оптоволоконных зондов для ближнепольной микроскопии.

На основе разработанного источника сферической волны был изготовлен **вакуумный интерферометр**, который уже более 4-х лет успешно работает в ИФМ РАН. Качество измерений формы оптических поверхностей таково, что на измерения уже заметное влияние оказывает гравитационное поле Земли. Поэтому форму оптических элементов в нашем интерферометре можно изучать в той ориентации по отношению к полю Земли, в какой они будут установлены в прибор. Чтобы удовлетворить этому условию интерферометр сделан по принципу «тяни-толкая», когда верхняя и нижняя части интерферометра зеркально симметричны.



Фотография (а) и оптическая схема (b) вакуумного интерферометра с дифракционной волной сравнения и электронно-микроскопическое изображение источника эталонной сферической волны на основе одномодового оптоволокна с зауженной до субволновых размеров выходной апертурой (с). 1 – ПК, 2 – ПЗС матрица, 3 – наблюдательная система, 4 – источник сферической волны, 5 – плоское зеркало, 6 – трехкоординатный прецизионный стол, 7 - исследуемая вогнутая поверхность, 8 – волокно, 9 – поляризационный контроллер, 10– лазер.

Появление метрологии стало стимулом для развития методов **изготовления оптических элементов с субнанометровой точностью формы поверхности.**

Изготовление подобной оптики происходит в два этапа. На первом этапе с использованием стандартных методов полировки и метрологии производится изготовление супергладкой поверхности. На втором этапе с применением методов локального ионно-пучкового травления и/или вакуумного напыления тонких пленок форма поверхности корректируется (исправляется) до субнанометровых отклонений от наперед заданной.



Основные разработчики вакуумного интерферометра с дифракционной волной сравнения, слева направо:

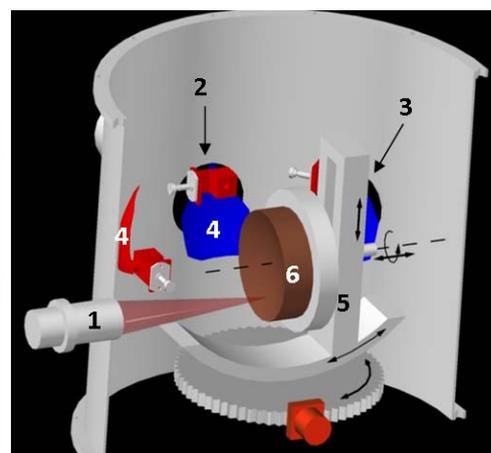
М.Н. Торопов, Б.А. Закалов, Н.И. Чхало, Д.Г. Волгунов, Н.Н. Салащенко.

Лабораторную технологию суперполировки оптических поверхностей, включая асферические, из плавленного кварца и монокристаллического кремния, разработал сотрудник ОАО “Композит”, г. Королев, **Струля И.Л.** совместно с сотрудниками ИФМ РАН. Для ионно-пучковой прецизионной коррекции формы супергладких поверхностей в ИФМ был разработан лабораторный стенд, оснащенный одним ионным источником, позволяющим работать только с инертными газами. Поскольку ключевым требованием к процессу коррекции является сохранение шероховатости на исходном, атомарно гладком уровне, то с помощью этой установки был проведен комплекс исследований по изучению влияния параметров технологических процессов на шероховатость поверхности. В результате этих исследований была разработана технология ионного травления

материалов, наиболее используемых в рентгенооптике: Cr/Sc MCC, плавленого кварца, ситалла и Zerodur.

На основе опыта работ с лабораторным экспериментальным стендом была разработана установка для ионно-пучковой коррекции подложек с диаметром до 300 мм, оснащенная уже тремя источниками ускоренных ионов, позволяющая, в том числе, работать с активными газами и проводить “ретушь” поверхности ионным пучком с диаметром около 1 мм.

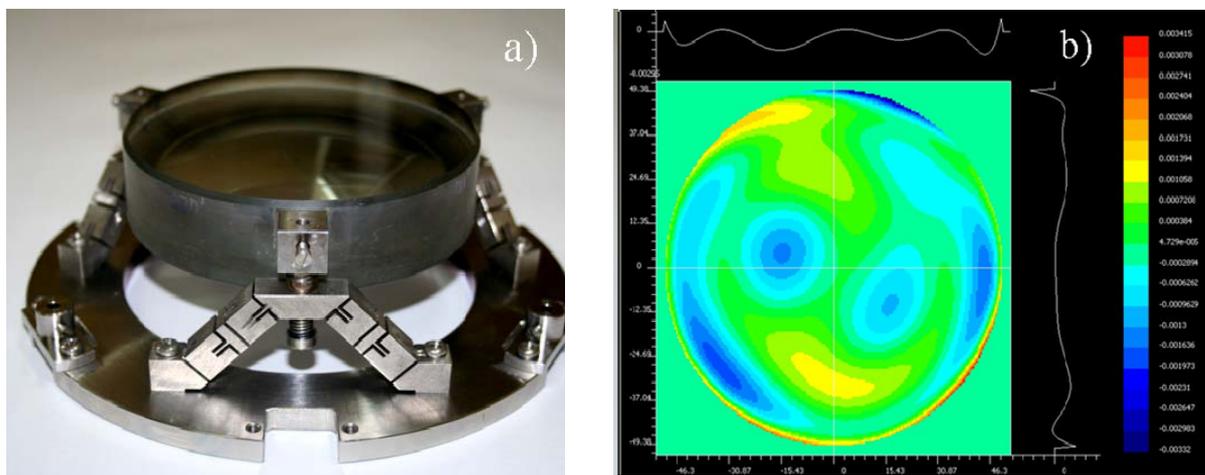
С использованием разработанного комплекса оборудования и технологий в ИФМ РАН изготавливаются сверхгладкие сферические и асферические поверхности с субнанометровой точностью. Типичное зеркало в оправе, предохраняющей поверхность от деформации при установке зеркала в прибор, показано на фотографии. Среднеквадратическая ошибка формы поверхности составляет 0.6 нм.



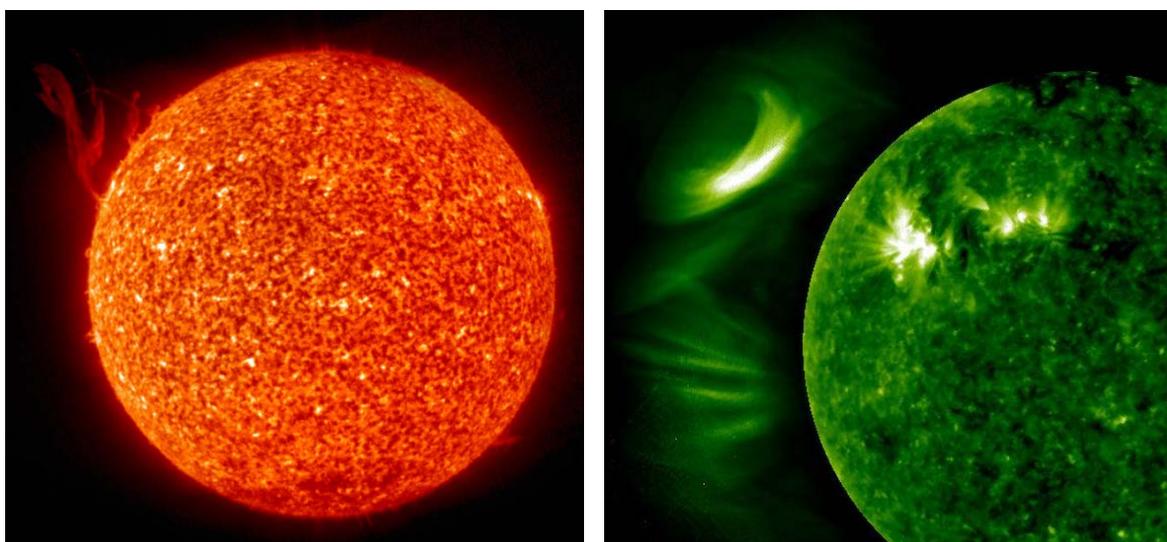
Стенд для прецизионной коррекции формы поверхности оптических элементов методом ионно-пучкового травления, разработанной в ИФМ РАН. Авторы разработки А.Е. Пестов и Н.И. Чхало. Справа показана схема стенда: 1 - источник с фокусировкой ионного пучка, 2 – ВЧ-источник с холодным катодом (апертура $\varnothing 150$ мм), 3 - источник с накаливаемым катодом (апертура 60×90 мм²), 4 - заслонка - измеритель ионного тока, 5 – пяти-осный гониометр, 6 – обрабатываемый образец.

Таким образом, за достаточно короткий срок в ИФМ РАН был создан технолого-метрологический комплекс, включающий интерферометр с дифракционной волной сравнения, установки ионно-пучкового травления и напыления тонких пленок, прецизионные рефлектометры, позволяющий создавать сверхгладкую и сверхточную оптику. Тем самым, хотя и в лабораторном варианте,

мы вошли в престижный клуб высокотехнологичных компаний, состоящий из ZEISS (ФРГ) и, частично, General Optics (США) и Nikon (Япония), обладающих суммой технологий необходимых для создания прецизионной оптики и проекционных объективов сверхвысокого разрешения.



Фотография вогнутой сферической подложки диаметром 130 мм и с числовой апертурой $NA=0.25$ и карта отклонений формы поверхности от ближайшей сферы: $P-V=7.3$ нм, $RMS=0.6$ нм.



Эрупция протуберанца Солнца. Наблюдения телескопа ТЕСИС в 2009 г. в линиях HeII 30.4 нм и Fe IX-XI 17.1 нм.

В настоящее время развитие в ИФМ РАН технологии применяются для изготовления оптики для выполнения **Российских программ по изучению Солнца** с использованием космических аппаратов. На рисунке приведены изображения короны Солнца на длинах волн 30.4 и 17.1 нм, полученные в 2009 г. в рамках эксперимента ТЕСИС.

Отраслью экономики, во многом определяющей лицо современной цивилизации, является в традиционном звучании микроэлектроника, а в современном, все чаще - наноэлектроника. При этом ключевой технологией микроэлектроники, в основном определяющей степень интеграции электронных элементов (транзисторов) в чипе, является **проекционная фотолитография**. Будущее литографических процессов связывается с рабочими длинами волн, лежащими в ЭУФ и даже МР диапазонах. С использованием рабочей длины волны 6.7 нм уже в обозримом будущем можно ожидать достижения топологических норм на уровне 10 нм и даже менее.

Ведущие мировые компании начали исследования в области ЭУФ литографии с середины 90-х годов прошлого столетия. К сожалению, несмотря на значительные заделы отечественной науки в области элементной базы ЭУФ литографии, прежде всего многослойной интерференционной оптики и источников ЭУФ излучения, должного внимания со стороны Российских элит это направление не получило. Можно отметить, что в середине 90-х в FOM-Институте Физики Плазмы (Нидерланды) была построена первая в Европе установка для демонстрации принципа ЭУФ литографии с лазерно-плазменным источником (*F. Bijkerk, L. Shmaenok, C. Bruineman*). Оптические элементы для установки были изготовлены в ИФМ РАН, что обеспечило получение в фоторезисте элементов рисунка с впечатляющими для того времени размерами - 100 нм. Уже в то время в нашем коллективе было изготовлено сферическое зеркало довольно большого диаметра, 250 мм, с заданным градиентным распределением периода многослойной структуры по поверхности.

В результате научного взаимодействия с ASMLithography, Нидерланды, по проблеме ЭУФ литографии совместно с *Л.А. Шмаёнком* был предложен принцип и создан компактный двузеркальный прибор для характеристики источников в спектральной области 13.5 нм в пределах “*in-band*” контура пропускания полной оптической системы ADT сканера. В приборе были применены пары зеркал со специально подобранной спектральной зависимостью коэффициента отражения, практически совпадающей со спектральной зависимостью пропускания многозеркальной (до 11 зеркал) оптической системой сканера. Разработанный прибор был выбран в 2004-2006 гг. консорциумом SEMATECH для программы сравнительной метрологии ЭУФ источников в лабораториях Европы, США и Японии.

С пониманием всей важности и актуальности для страны направления проекционной нанолитографии на длине волны 13.5 нм, и с надеждой, что Россия со временем займет подобающее ей место в мировом инновационном процессе, в рамках мизерных, по сравнению с зарубежными корпорациями, финансовых ресурсов, при финансовой поддержке РАН (Программа **Ж.И. Алферова**), РосАтома (здесь большую роль сыграл в то время министр атомной промышленности академик **А.Ю. Румянцев**) и РФФИ, с начала 2000-х годов мы занялись этой проблемой.



Фотография нанолитографа-мультипликатора, разработанного в ИФМ РАН.

Основные разработчики нанолитографа-мультипликатора (слева-направо):

сидят: Б.А. Закалов, Н.Н. Салащенко, И.Г. Забродин.

*стоят: В.Н. Полковников, Л.А. Суслов, А.Е. Пестов, Д.Г. Волгунов, Н.Г. Гуськов,
М.Н. Торопов, Н.И. Чхало, С.Ю. Зуев, И.А. Каськов.*

Как уже отмечалось выше, в рамках этих исследований были созданы критически важные технологии мирового уровня в области прецизионной оптики, а по спектральным фильтрам и, в общем, по свободновисящим многослойным структурам нам удалось опередить ближайших конкурентов. В результате в ИФМ был разработан и запущен в 2011г. первый в России стенд ЭУФ литографа с

расчетным разрешением 30 нм. В настоящее время методом проекционной литографии с рабочей длиной волны 13.5 нм уже получены первые микроструктуры.

Одним из заметных научных результатов в области ЭУФ литографии, полученным совместно с сотрудниками Института химии при ННГУ им. Н.И. Лобачевского, является разработка **отечественных фоторезистов для длины волны 13.5 нм**. Эти работы были начаты в начале 2000-х, и в них участвовал большой коллектив исследователей с обеих сторон. Со стороны разработчиков химического состава фоторезистов есть квалифицированный и признанный в коллективе лидер, **С.А. Булгакова**. По чувствительности к излучению 13.5 нм и контрасту проявленного изображения разработанные фоторезисты соответствуют лучшим мировым аналогам. В настоящее время начаты исследования разрешающей способности фоторезистов и в ближайшем будущем будет изучена их плазмостойкость.



Основные разработчики фоторезистов для излучения с длиной волны 13.5 нм.

*Слева – направо:
М.М. Джонс,
С.А. Булгакова,
В.И. Лучин,
А.Я. Лопатин,
А.Е. Пестов,
М.Н. Торопов.*

В последнее время микрoeлектронное сообщество начало активную подготовительную работу по переходу к **литографии** уже следующего поколения, после 13.5 нм. Надо отметить, что в выборе новой длины волны, **область 6.7 нм**, свою роль сыграли и предложения, сделанные в ASML в 2006 г. **Н.Н. Салащенко** и **Н.И. Чхало**. Мы продолжаем разрабатывать технологические аспекты изготовления эффективной многослойной оптики для этого спектрального диапазона. В 2012 г. были синтезированы $La/B_4C/C$ многослойные рентгеновские

зеркала нормального падения с барьерными слоями из сверхтонких пленок углерода с рекордными, до 60%, коэффициентами отражения. Полученный результат может служить экспериментальной основой оптики для нанолитографов следующего поколения с пространственным разрешением до 8 нм.

Относительно новым направлением, у истоков которого мы находимся, является **рентгеновская микроскопия** сверхвысокого пространственного разрешения на основе многослойной оптики нормального падения. Благодаря резонансному взаимодействию излучения этого диапазона с атомами (энергии фотонов совпадают с внутриатомными переходами и с потенциалами ионизации низких уровней), наблюдается экстремально высокий контраст абсорбционных изображений. В частности, в ряде случаев это приводит к тому, что необходимая для надежной регистрации изображений поглощенная в образце доза на несколько порядков меньше, чем в случае электронной или рентгеновской микроскопии жесткого диапазона. Последнее, например, позволяет изучать даже живые объекты с разрешением в несколько десятков нанометров.

Использование эффектов магнитного и электрического дихроизма, наблюдаемых для ряда материалов в мягком рентгеновском диапазоне, в совокупности с микроскопией открывает исследователям нано-(электро)магнетизма колоссальные перспективы.

Можно отметить, что исследования в области мягкой рентгеновской микроскопии высокого разрешения стали возможными, только благодаря прогрессу в технологии напыления короткопериодных многослойных рентгеновских зеркал нормального падения, метрологии и изготовлении сверхточной изображающей оптики. Можно надеяться, что благодаря высокой эффективности отражения многослойных зеркал, рентгеновские микроскопы будут использоваться в биологических лабораториях и со временем станут такими же доступными, как атомно-силовые или электронные микроскопы. Большую роль в этом прорыве сыграли сотрудники нашего отдела, а в дальнейшем (*хочется надеяться*) лидером этого направления станет наш сегодняшний аспирант **Щербаков А.В.**



*П.К. Гайкович, Д.Е. Парьев,
А.В. Щербаков – им и
начинать работу по
рентгеновскому микроскопу
для биологических
исследований.*

*Кому как не молодым
начинать новые
направления!*

К основным научным и технологическим результатам этого раздела можно отнести следующие:

- Создан технологически-измерительный комплекс для изготовления и аттестации оптических элементов с субнанометровым среднеквадратическим отклонением формы поверхности от заданной и оптических систем с абберацией волнового фронта на субнанометровом уровне. Создание комплекса открывает возможности для разработки в России оптики для проекционной нанолитографии, рентгеновской микроскопии и астрономии сверхвысокого разрешения. С применением комплекса разработан и изготовлен проекционный объектив для нанолитографа с рабочей длиной волны 13.5 нм.
- Разработан интерферометр с дифракционной волной сравнения, обеспечивающий аттестацию формы светосильных оптических элементов и волновые деформации сложных систем с точностью на уровне 0.2-0.3 нм. Разработаны физические методы коррекции формы поверхностей, в том числе и асферических, с субнанометровой точностью. Эти работы заложили основу для развития в России передовых технологий в области создания литографического оборудования нового поколения, оптических и рентгеновских микроскопов нанометрового разрешения, рентгеновских телескопов сверхвысокого разрешения и др.

5. Фокусировка и коллимация жесткого рентгеновского излучения

Одно из достаточно хорошо востребованных направлений многослойной рентгеновской оптики связано с развитием элементов и узлов формирования пучков жесткого рентгеновского излучения. В основе направления лежит очень простая мысль, которую высказал и запатентовал немецкий ученый Н. Göbel, который предложил соединить возможности многослойной рентгеновской оптики и формирователей излучения с формой элементарных геометрических фигур, например, цилиндрических параболоидов или эллипсоидов. В случае линейных источников излучения такие формирователи позволяют получать или параллельный рентгеновский пучок, или переносить во второй фокус с заданным масштабным коэффициентом линейный источник.

Особенность нанесения многослойных структур для таких формирователей излучения связана с необходимостью выполнить соотношение Брэгга ($2d \cdot n \cdot \sin \theta \approx \lambda$, n – показатель преломления, θ – угол скольжения) в каждой точке поверхности. Т.е. распределение величины периода МСС по длине зеркала должно быть переменным и удовлетворять условию Брэгга в каждой точке. Такие зеркала нашли широкое применение как в серийных приборах (дифрактометры, рентгенофлуоресцентный анализ) ведущих мировых производителей рентгеновской аппаратуры, так и в синхротронных лабораториях мира. Применение изогнутых по заданному закону многослойных зеркал позволяет увеличить светосилу приборов в десятки-сотни раз.

Для проведения рентгеноструктурного анализа, как правило, малоразмерных, биологических объектов, например, протеинов, используются точечные источники излучения. Формирование пучков излучения от точечных источников традиционно основывается на различных вариантах хорошо известных скрещенных систем Киркпатрика-Баеза, среди которых наибольшей светосилой обладают симметричные уголкового системы, состоящие из двух одинаковых скрещенных многослойных зеркал в форме эллиптического цилиндра с взаимно перпендикулярными образующими. Технология изготовления уголкового систем основана на хорошо развитой технологии изготовления цилиндрических отражателей. Однако существенно большей (в десятки раз) светосилой обладают

формирователи с формой эллипсоида вращения. Потребности в таких формирователях излучения точечных источников в настоящее время существуют, особенно для изучения биологических объектов. В лабораторных вариантах формирователи с фигурой вращения существуют, показана перспективность их применений, однако существуют и большие технологические проблемы их изготовления.

Технология изготовления многослойных эллиптических и параболических цилиндров хорошо развита в ряде организаций в мире, в том числе в ИФМ РАН, в группе *А.Д. Ахсаханяна*. Основные достижения группы связаны с тем, что в ней комплексно на мировом уровне разработана полная технология изготовления цилиндрических формирователей излучения, включая методы изготовления прецизионных шаблонов, определяющих форму образующих цилиндров, технологию нанесения МСС с заданным распределением периода, методы сборки и сертификации готовых формирователей излучения. Разработанные формирователи излучения находят применение как в рентгеновских дифрактометрах ведущих мировых производителей, так и в основных отечественных дифрактометрах.



Группа разработки многослойных формирователей “жесткого” рентгеновского излучения. А.А. Ахсаханян, А.Д. Ахсаханян, А.И. Харитонов, Л.А. Мазо.

Светосилу систем Киркпатрика-Байеза можно увеличить путем увеличения числа отражающих элементов вокруг оптической оси. В ИФМ впервые в мире была

изготовлена и изучена четырехугольная система, светосила которой, соответственно, в четыре раза превосходила светосилу симметричных уголкового систем такой же длины.

Сложней обстоят дела в части разработки технологии изготовления формирователей излучения с формой фигур вращения, светосила которых, в принципе, может в десятки раз превосходить светосилу уголкового систем. Были разработаны две методики изготовления зеркал с формой фигур вращения и методы контроля формы. В первой методике поверхность вращения формируется методом реплик, во второй – методом плазмохимического травления. По этим методикам изготовлены и исследованы зеркала, которые продемонстрировали отражательные характеристики, близкие к расчетным. Это можно считать хорошим технологическим заданием на будущее, но, конечно, основная работа еще впереди.

К основным научным и технологическим результатам можно отнести:

- Разработку методов расчета и оптимизации характеристик зеркал, с учетом реальных размеров источников рентгеновского излучения, технологических возможностей по изготовлению многослойных структур и требований на характеристики формируемых пучков рентгеновского излучения.
- Разработку технологий изготовления фокусирующих и коллимирующих зеркал, включая методы аттестации отражательных и геометрических характеристик поверхности и формируемых рентгеновских пучков.

6. Заключение

В рамках данного “исторического” обзора мы попытались описать современное состояние исследований в ИФМ РАН в области изготовления и ряда применений нового класса оптики - многослойной оптики для МР и ЭУФ диапазонов. Можно отметить, что благодаря колоссальному прогрессу в мире в последние десятилетия в технологии нанесения многослойных покрытий для “рентгеновских” зеркал, в изготовлении и сертификации оптических элементов и систем дифракционного качества для МР и ЭУФ диапазонов, появилась реальная возможность, в значительной мере уже реализованная, переноса практически всего арсенала традиционных методов управления световыми пучками (*монохроматизация, фокусировка, коллимация, построение изображений, деление пучков, поляризация, фазосдвигающие элементы и анализаторы и др.*) в коротковолновый (нанометровый) диапазон длин волн. Это открывает принципиально новые возможности в микроскопии конденсированного вещества, для исследований в биологии, астрофизике и в других областях, в нанотехнологиях, прежде всего в литографии и в нанодиагностике.

Этот прогресс стал результатом широких исследований в ряде смежных областей физики твердого тела, поверхности, роста тонкопленочных структур, физической оптики и др. Он потребовал создания совершенных технологий роста многослойных структур, новых технологий и методов изготовления и измерения оптических элементов и систем с беспрецедентной точностью. И в этой связи следует отметить заметную роль ИФМ РАН в создании этого направления. Из основных результатов 20-летнего развития направления многослойной рентгеновской оптики в ИФМ РАН, которые скажутся и на дальнейшей творческой жизни коллектива, можно отметить следующие.

В ИФМ РАН развиты технологии нанесения многослойных структур из сверхтонких пленок, оптимизированных для элементов многослойной оптики для рентгеновского и экстремального ультрафиолетового диапазонов. Создан комплекс специализированного технологического оборудования для нанесения многослойных структур с заданным распределением периода по поверхности на подложки с диаметром до 350 мм при практически любой форме поверхности.

Создан технологически-измерительный КОМПЛЕКС для изготовления и аттестации оптических элементов с субнанометровым среднеквадратичным отклонением формы поверхности от заданной и оптических систем с аберрацией волнового фронта на субнанометровом уровне. Создание комплекса открывает новые возможности для разработки в России прецизионной оптики для проекционной нанолитографии, рентгеновской микроскопии и астрономии сверхвысокого разрешения, для формирования сверхсильных электромагнитных полей оптического и мягкого рентгеновского диапазонов.

Метрологической основой комплекса является разработанный в ИФМ интерферометр с дифракционной волной сравнения, обеспечивающий аттестацию формы светосильных оптических элементов и волновые деформации сложных систем с точностью на уровне 0.2-0.3 нм. Базовая модель существующего интерферометра служит прототипом для дальнейшего развития целой гаммы интерферометров и методов прецизионной интерферометрии. Разработаны физические методы коррекции формы поверхностей, в том числе и асферических, с субнанометровой точностью.

На основе фундаментальных исследований в области нанотехнологий впервые в России создан стенд нанолитографии ($\lambda=13.5$ нм) с проектным разрешением 30 нм. Получены первые образцы микроструктур. Создание стенда продемонстрировало появление технологий, позволяющих разрабатывать и производить в России современное литографическое оборудование, которое в ближайшие годы станет основным при производстве чипов с топологическими нормами 22-8 нм, изготавливать оптические системы сверхвысокого пространственного разрешения для астрономии и микроскопии коротковолнового диапазона. Данная разработка, в совокупности с другими отечественными разработками в области мощных газоразрядных источников ЭУФ излучения, может стать основой для отечественной программы производства компонентов наноэлектроники.

На основе оригинальной методики формирования свободновисящих многослойных пленок разработан ряд рентгенооптических элементов с новыми свойствами. Периодические структуры с малой шероховатостью межслойных границ ($\sigma \approx 0.3$ нм) применены в качестве фазовращателей для интервала длин волн

1.5–4.5 нм, впервые в этом диапазоне продемонстрирован аналог четвертьволновой пластинки. Созданы многослойные зеркала с малыми радиусами кривизны для фокусирующих отражателей в форме эллипсоида вращения для жесткого рентгеновского диапазона ($\lambda \sim 0.1$ нм) и цилиндрических дисперсионных элементов для светосильного спектрометра мягкого рентгеновского диапазона. Для применений в стендах проекционной нанолитографии ($\lambda = 13.5$ нм) разработана технология изготовления термостойких свободностоящих спектральных фильтров и элементов пленочной защиты маски с рекордными характеристиками (апертура до 160 мм, толщина 20-50 нм и пропускание $\geq 70\%$).

Развита технология изготовления и методы аттестации многослойных формователей жесткого рентгеновского излучения, включая фокусирующие (эллиптические) и коллимирующие (параболические) цилиндрические зеркала.

Теперь можно проявить фантазию на тему о возможных путях развития научного направления *«Многослойная рентгеновская оптика»*.

Привычный оптический диапазон, если рассматривать его в спектральной области от 0.1 мкм до 1 мм, включает в себя и обширный ультрафиолетовый диапазон, в том числе вакуумный ультрафиолет, относительно узкий видимый диапазон, ближний и дальний ИК диапазон, и даже субмиллиметровый диапазон, или, как его теперь называют, терагерцовый диапазон. Т.е. этот обширный спектральный диапазон включает много, даже не очень-то и связанных, поддиапазонов. В этом диапазоне наблюдается масса физических эффектов, в которых трудятся специалисты совершенно разных специальностей, не всегда понимающие друг друга.

Практически столь же широкий спектральный диапазон занимает область от жесткого рентгеновского до длинноволнового края экстремального ультрафиолетового излучения, $\lambda \approx 0.01-100$ нм. Но так как в настоящее время еще только происходит освоение этого коротковолнового диапазона, то мы, как разработчики оптических элементов и оптических схем на основе этих элементов, а эффективная оптика здесь может быть только многослойной, рассматриваем весь этот диапазон как нечто единое. И пытаемся не только разрабатывать оптику, но и применять ее в физических экспериментах и приборостроении во всей этой

спектральной области. Конечно, и в этой спектральной области уже произошли разделения на более узких специалистов. Например, разработчики источников излучения (газоразрядных и лазерно-плазменных источников, лазеров на свободных электронах) представляют отдельные специальности. Есть спектроскописты, есть астрономы и т.д. Они тоже уже недостаточно хорошо связаны между собой. Но зато все они не могут обойтись без соответствующих оптических элементов, а значит и без нас. Поэтому пока специалисты в “нашем” диапазоне далеко не “разбежались”, мы можем и в дальнейшем работать со всеми и на всех.

Наше участие в дальнейшем развитии многослойной оптики коротковолнового диапазона, конечно, связано с наработками предыдущих лет в технологии нанесения и метрологии различных многослойных структур для элементов “рентгенооптики”, в изготовлении и метрологии прецизионной изображающей оптике. На этой основе предполагается и в дальнейшем заниматься проблемами, в которых эти наработки являются ключевыми. Можно рассмотреть некоторые пути нашего развития.

Первый путь может быть связан с выбором одного или двух научно-технических направлений, в перспективе практически полезных или для человечества, или для страны, а лучше, чтобы это совпадало. Решение поставленных проблем должно быть связано с постановкой и разрешением многочисленных фундаментальных и прикладных задач. Доведение до конца практически важной большой задачи совсем не обязательно только собственными силами, главное для нас состоит в решении принципиальных вопросов в поставленной проблеме. Примерами таких проблем могут быть служить следующие:

- (1) Разработка лабораторного стенда проекционной литографии на длине волны 6.7 нм или на другой длине волны, на которой можно в перспективе обеспечить разрешение на уровне 8-10 нм при большей, или равной производительности по сравнению с EUV литографией на длине волны 13.5 нм.

(2) Разработка рентгеновского микроскопа с пространственным разрешением 5-10 нм для изучения биологических объектов на линиях конкретных химических элементов, интересных для биологии.

Для решения таких проблем требуется дальнейшее и существенное развитие многослойной оптики. В частности, развитие технологии изготовления и метрологии асферических элементов изображающей оптики с формой поверхности, выполненной с субангстремной точностью при шероховатостях поверхности также на субангстремном уровне. Потребуется продолжение исследований и разработок по свободновисящим элементам оптики, по развитию методов управления спектральными и угловыми характеристиками многослойных зеркал.

К исследованиям в области разработки коротковолновой оптики для задач нанолитографии и микроскопии тесно примыкают исследования, направленные на разработку аппаратуры (телескопов) для “рентгеновской” астрономии. Требования к оптическим элементам для телескопов на ближайшие 10 лет стали практически такого же уровня, как к оптике для литографов на длине волны 13.5 нм.

По поводу нашего участия в решении проблем нанолитографии и рентгеновской микроскопии можно сделать следующие замечания. На наш взгляд, разработка отечественного сканера представляется мало реальной. Несомненно, что для понимания проблем, полезно самим разрабатывать макетные образцы или проекционных схем, или простейших сканеров. Но делать проект разработки собственного высокопроизводительного сканера? Это очень дорогостоящий проект, который должны выполнять совместно промышленные и научные организации, но определять программу работ должны именно промышленные предприятия. При этом должны участвовать самые продвинутые коллективы, как это делается на Западе и в Японии. Даже если сканер будет разработан и изготовлен, его нужно вставить в технологическую линию микро-нано-электроники. Существующие линии микроэлектроники в стране в настоящее время только покупные на Западе, т.е. разработанный сканер должен вставляться в купленную технологическую линию. Разработанный сканер должен быть конкурентно-способным товаром, должен тиражироваться и продаваться в

условиях, когда мировой рынок сканеров жестко поделен. Но можно сделать первую в мире проекционную схему на длине волны 6.7 нм, если мы решим проблемы с прецизионной изображающей многослойной оптикой. А предпосылки к этому появились у нас только в последнее время. По источникам излучения и газоразрядным (ИС РАН), и гиротронным (ИПФ РАН), и на основе рентгеновских лазеров на свободных электронах (ИЯФ СО РАН), хочется думать, в стране есть хорошие наработки. Тогда с российской стороны мог бы быть вклад в мировое сообщество в виде оптической элементной базы и источников излучения для сканеров следующего поколения.

Что касается рентгеновского микроскопа для биологии, то это, конечно, более камерная задача. При должном взаимодействии с биологами можно разработать полезный инструмент, который, как пока представляется, может иметь и коммерческие перспективы. Но и в этом вопросе много конкретных частных проблем. Понятно, что для финансирования разработки микроскопа, необходимо сначала продемонстрировать хотя бы лабораторный образец микроскопа и предварительные результаты изучения биологических образцов. И это представляется реальным.

Второй путь нашего развития может быть связан с развитием технологий изготовления, методов диагностики и сертификации оптической элементной базы для спектрального диапазона 0.01-100 нм. Это потребует решения многих фундаментальных научных и технологических задач, дальнейшего развития технологической, исследовательской и измерительной базы. Развитие в таком направлении предполагает тесное взаимодействие с ведущими группами и организациями в мире, чтобы можно было понимать, какие имеются конкретные проблемы в освоении “нашего” спектрального диапазона. Реально такое развитие вместе с миром возможно, если наша группа будет в каких-то принципиальных вопросах, пусть не во всех, лучше других и это будет хорошо известно в мире. Т.е. публикации должны быть высокого уровня, а принципиальные образцы оптических элементов или узлов прошли тестирование в ведущих группах.

По-видимому, наиболее реален симбиоз из двух путей развития многослойной рентгеновской оптики. Нужно иметь свою “большую” задачу, например,

разработку лабораторных образцов нанолитографа на длине волны 6/7 нм и рентгеновского микроскопа. При этом параллельно необходимо совершенствовать элементную базу для рентгеновского и ЭУФ диапазонов как для собственных разработок, и для зарубежных научных организаций, что позволит привлечь дополнительные средства. В такую стратегию развития могут вписаться и задачи рентгеновской астрономии.

В заключение более конкретно представим основные направления развития исследований в области многослойной “рентгеновской” оптики в ИФМ РАН.

1. Развитие оптики для XEUV спектрального диапазона ($\lambda \sim 0.01-100$ нм)

- 1.1. Развитие технологического и метрологического оборудования и технологии нанесения МСС для элементов многослойной рентгенооптики. По-видимому, особое внимание следует уделить развитию стенда для нанесения МСС методами магнетронного и ионно-пучкового распылений (отдельно или совместно) с возможностью применения ионной полировки поверхности каждого нанесенного слоя.
- 1.2. Развитие методов диагностики шероховатостей всех масштабов для супергладких поверхностей, разработка соответствующего лабораторного оборудования.
- 1.3. Развитие технологически-измерительного комплекса для изготовления изображающей прецизионной оптики.
 - 1.3.1. Развитие интерферометров с дифракционной волной сравнения, включая оптимизацию корректоров волнового фронта сферической волны для измерения формы асферических поверхностей.
 - 1.3.2. Развитие методов и оборудования для прецизионной коррекции формы поверхности. Изучение возможности сильной (на десятки микрометров) асферизации супергладких поверхностей методами ионного травления.
 - 1.3.3. Развитие методов управления (компенсации) стрессом МСС.
- 1.4. Развитие методов изготовления и диагностики свободновисящих пленочных структур (многослойные зеркала; нерезонансные многослойные структуры типа спектральных фильтров).

- 1.5. Развитие методов изготовления и аттестации многослойной оптики для формирования пучков “жесткого” рентгеновского излучения.
- 1.6. Развитие технологии изготовления и сертификации многослойных дисперсионных элементов.
- 2. Создание элементной базы и участие (в России и в мире) в создании проекционной XEUV литографии** на длинах волн 13.5 нм и 6.7 нм, или на альтернативных длинах волн
 - 2.1. Создание лабораторной технологии изготовления эффективной многослойной оптики для спектральной области 6.7 нм и поиск альтернативных длин волн для литографии следующего поколения.
 - 2.2. Развитие свободновисящих пленочных структур для стендов проекционной нанолитографии на длине волны 6.7 нм и на альтернативных длинах волн.
 - 2.3. Создание макетного образца проекционной схемы на длине волны 6.7 нм или на альтернативной длине волны, оптимизация фоторезистов для выбранной спектральной области.
 - 2.4. Развитие лабораторного образца нанолитографа-мультипликатора на длине волны 13.5 нм. Оптимизация фоторезистов для области 13.5 нм.
 - 2.5. Инициирование и участие в разработке Программы коротковолновой нанолитографии в России.
- 3. Создание элементной базы и разработка рентгеновских микроскопов с пространственным разрешением 5-20 нм, в т.ч. для исследований биологических объектов в области «окна прозрачности воды и углерода»**
- 4. Инновационная деятельность.** *Рассматриваем результаты исследований, представляющие инновационный интерес в России и в мире. По всем пунктам инноваций предполагается соответствующее патентование.*
 - 4.1. Многослойные дисперсионные элементы, включая фокусирующие элементы.
 - 4.2. Элементы управления жестким рентгеновским излучением.
 - 4.3. Элементы прецизионной изображающей оптики, включая эталонные поверхности (в т.ч. и асферические) для схем традиционных интерферометров.
 - 4.4. Свободновисящие пленочные структуры.

- 4.5. Элементы схем для “рентгеновской” астрономии.
- 4.6. Источники сферической волны для интерферометров.
- 4.7. Интерферометры с дифракционной волной сравнения. Предполагается разработка промышленного интерферометра совместно с промышленностью.

Избранные публикации 1993 - 2012 года

- A.I. Chumakov, G.V. Smirnov, J. Arthur, S.L. Rude, D.E. Brown, A.Q.R. Raron, G.S. Rroun, N.N. Salashchenko. *Resonant Diffraction of Synchrotron Radiation by a Ni/Cr multilayer*. // Phys. Rev. Lett., V.71, №15, 1993, p. 2489-2492.
- S.I. Zheludeva, M.V. Kovalchik, N.N. Novikova, A.N. Sosphenov, N.E. Malysheva, N.N. Salashchenko, A.D. Akhsakhalyan, Yu.Ya. Platonov. *New modification of XRSW at both the surface of layered substrate under total external reflection conditions for structure characterization of organic layers*. // Thin Solid Films, 1993, V.232, p.252-256.
- A.D. Akhsakhalyan, N.N. Kolachevsky, M.M. Mitropolsky, E.M. Ragozin, N.N. Salashchenko, V.A. Slemzin. *Fabrication and Investigation of imaging Normal-Incidence Multilayer Mirrors with a Narrow-Band Reflection in the Range 4,5nm*. // Physica Scripta, V. 48, 566-570, 1993.
- V.A. Slemzin, I.A. Zhitnik, E.N. Ragozin, A.A. Andreev, N.N. Salashchenko, Yu.Ya. Platonov. *Aspherical imaging multilayer mirrors with sub-arcsecond resolution for solar XUV-telescope*. // SPIE Proc., V.2279, 1994, p. 234.
- N.N. Salashchenko, Yu.Ya. Platonov, S.Yu. Zuev. *Multilayer x-ray optics for synchrotron radiation*. // NIM, 1995, A359, p.114-120.
- N.N. Salashchenko, E.A. Shamov. *Short - period X - ray multilayers based on Cr/Sc*. // Optics communication, **134**, N 1-6, p.7-10 (1997).
- A.B. Андреев, Ю.В. Пономарев, И.Р. Прудников, Н.Н. Салащенко. *Резонансное усиление диффузного рассеяния рентгеновских лучей в гетероструктуре волноводного типа*. // Письма в ЖЭТФ, **66**, 1997, вып. 4, с. 219-223.
- F. Schaefer, H.-Ch. Mertins, I. Packe, F. Schmolla, N.N. Salashchenko, E.A. Shamov. *Cr/Sc - Multilayers for the Water Window*. // Applied Optics, **37**, 719-728 (1998).
- S.S. Andreev, H.-Ch. Mertins, Yu.Ya. Platonov, N.N. Salashchenko, F. Schaefer, L.A. Shmaenok. *Multilayer dispersion optics for x-ray radiation*. // Nucl. Instrum. and Meth. 2000, A448, 133-141.
- L.A. Shmaenok, S.V. Golovkin, V.N. Govorun, A.V. Ekimov, N.N. Salashchenko, V.V. Pickalov, V.P. Belik, F.C. Schüller, A.J.H. Donné, A.A.M. Oomens, K.A. Prokhorov, S.S. Andreev, A.A. Sorokin, B.G. Podlaskin, L.V. Khasanov. *Novel Instrumentation for Spectrally Resolved Soft X-Ray Plasma Tomography: Development and Pilot Results on TEXTOR*. // Review of Scientific Instruments, Vol. 72, No. 2, 1411-1415, 2001.
- С.Ю.Зуев, Е.Б.Клюенков, К.А. Прохоров, Н.Н. Салащенко. *Многослойные дисперсионные элементы на основе В₄С для спектральной области $\lambda=6.7-8$ нм*. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2002, N1, 27-31.
- S.S. Andreev, A.D. Akhsakhalyan, M.A. Bibishkin, N.I. Chkhalo, S.V. Gaponov, S.A. Gusev, E.B. Klunokov, K.A. Prokhorov, N.N. Salashchenko, F. Schäfers, S.Yu. Zuev. *Multilayer optics for XUV spectral region: technology fabrication and applications*. // Centr. Europ. Journ.of Phys. 2003. 1, p.191-209.
- S.S. Andreev, M.S. Bibishkin, N.I. Chkhalo, E.B. Klunokov, K.A. Prokhorov, N.N. Salashchenko, M.V. Zorina, F. Schaefer and L.A. Shmaenok. *Short - period multilayer X - ray mirrors*. // Journal of Synchrotron Radiation Vol 10, Part 5, (2003) 358-360.
- A.A. Akhsakhalyan, A.D. Akhsakhalyan, A.I. Kharitonov, E.B. Klunokov, V.A. Murav'ev, N.N. Salashchenko. *Multilayer mirror systems to form hard X-ray beams*. // Central European Journal of Physics 3(2) 2005 163-177.
- Ю.А. Вайнер, А.Е. Пестов, К.А. Прохоров, Н.Н. Салащенко, А.А. Фраерман, В.В. Чернов, Н.И. Чхало. *Исследование поперечной корреляции шероховатостей границ в многослойных структурах с ультракороткими периодами*. // ЖЭТФ, т.130, № 3, с. 401-408, (2006).
- Н.Н. Салащенко, Н.И. Чхало. *Коротковолновая проекционная литография*. // Вестник Российской Академии Наук. Том 78. №5. 2008. С.13-20.
- N.I. Chkhalo, A.Yu. Klimov, V.V. Rogov, N.N. Salashchenko, and M.N. Toropov. *A source of a reference spherical wave based on a single mode optical fiber with a narrowed exit aperture*. // Rev. Sci. Instrum. V.79, Issue 3. 2008.

- А.В. Водопьянов, С.В. Голубев, Д.А. Мансфельд, А.Г. Николаев, К.П. Савкин, Н.Н. Салашенко, Н.И. Чхало, Г.Ю. Юшков. *Источник жесткого ультрафиолетового излучения на основе ЭЦР разряда.* // Письма в ЖЭТФ, 2008, т. 88, в. 2, с. 103-106.
- Е.Б. Ключенков, А.Е. Пестов, В.Н. Полковников, Д.Г. Раскин, М.Н. Торопов, Н.Н. Салашенко, Н.И. Чхало. *Измерение и коррекция формы оптических элементов с субнанометровой точностью.* // Российские нанотехнологии, т. 3, № 9–10, 116-124 (2008).
- Ю.Э. Бороздин, Е.Д. Казаков, В.И. Лучин, Н.Н. Салашенко, В.В. Чернов, Н.И. Чхало, А.П.Шевелько, О.Ф.Якушев. *Рентгеновская и ВУФ спектроскопия плазмы с использованием новых фокусирующих многослойных структур.* // Письма в ЖЭТФ, **87**, в.1, 33-35 (2008).
- S.S. Andreev, M.M. Barysheva, N.I. Chkhalo, S.A. Gusev, A.E. Pestov, V.N. Polkovnikov, N.N. Salashchenko, L. A. Shmaenok, Y.A. Vainer, S.Y. Zuev. *Multilayered structures based on La/B4C (B9C) for projection XUV-lithography at wavelength of 6.7 nm.* Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. V.603. Issues 1-2. 2009. P. 80-82.
- N.I. Chkhalo, E.B.Kluenkov, A.E.Pestov, V.N. Polkovnikov, N.N. Salashchenko, M.N. Toropov. *Manufacturing of XEUV mirrors with sub-nanometer surface shape accuracy.* Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. V.603. 2009. Issues 1-2. 2009. P. 62-65.
- С.С. Андреев, М.М. Барышева, Н.И. Чхало, С.А. Гусев, А.Е. Пестов, В.Н. Полковников, Д.Н. Рогачев, Н.Н. Салашенко, Ю.А. Вайнер, С.Ю. Зуев. *Многослойные рентгеновские зеркала на основе La/B4C и La/B9C.* // ЖТФ, 2010, Vol. 80, No. 8, с. 93–100.
- N.I. Chkhalo, A.E. Pestov, N.N., Salashchenko and M.N. Toropov (2010). *Manufacturing and Investigating Objective Lens for Ultrahigh Resolution Lithography Facilities*, Lithography, Michael Wang (Ed.), ISBN: 978-953-307-064-3, pp. 656, (p. 71-114) INTECH, Available from: <http://sciyo.com/articles/show/title/manufacturing-and-investigating-objective-lens-for-ultrahigh-resolution-lithography-facilities>
- M.M. Barysheva, B.A. Gribkov Yu. A. Vainer, M.V. Zorina, A.E. Pestov, Yu. Ya. Platonov, D.N. Rogachev, N.N. Salashchenko, N.I. Chkhalo. *Problem of roughness detection for supersmooth surfaces.* // Proc. of SPIE. V. 8076. P. 80760M-1-10. 2011.
- N.I. Chkhalo, M.N. Drozdov, S.A. Gusev, E.B. Kluenkov, A.Ya. Lopatin, V.I. Luchin, N.N. Salashchenko, L.A. Shmaenok, N.N. Tsybin, B.A. Volodin. *Freestanding multilayer films for application as phase retarders and spectral purity filters in the soft X-ray and EUV ranges.* // Proc. of SPIE. V. 8076. P. 80760O-1-11. 2011.
- N.I. Chkhalo, M.M. Barysheva, A.E. Pestov, N.N. Salashchenko, M.N. Toropov. *Manufacturing and characterization the diffraction quality normal incidence optics for the XEUV range.* // Proc. of SPIE. V. 8076. P. 80760P-1-13. 2011.
- С.Ю. Зуев, Е.Б. Ключенков, А.Е. Пестов, В.Н. Полковников, Н.Н. Салашенко, Л.А. Суслов, М.Н. Торопов, Н.И. Чхало. *Технологический комплекс для изготовления прецизионной изображающей оптики.* // Известия РАН. Серия физическая. 2011, том 75, № 1, с. 57–60
- М.М. Барышева, А.Е. Пестов, Н.Н. Салашенко, М.Н. Торопов. *Прецизионная изображающая многослойная оптика для мягкого рентгеновского и экстремального ультрафиолетового диапазонов.* // УФН, 2012, т. 182, №7 с. 727-747.
- N.I. Chkhalo, M.N. Drozdov, E.B. Kluenkov, A.Ya. Lopatin, V.I. Luchin, N.N. Salashchenko, N.N. Tsybin, L.A. Shmaenok, V.E. Banine, A.M. Yakunin. *Free-standing spectral purity filters for EUV lithography.* // Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS, 11(2), 021115-1-7. 2012.
- N.I. Chkhalo, S.V. Golubev, D.A. Mansfeld, N.N. Salashchenko, L.A. Shmaenok and A.V. Vodopyanov. *Source for EUVL based on plasma sustained by millimeter-wave Gyrotron radiation.* // Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS. 11(2), 021123 (1-7).2012.
- N.I. Chkhalo, S. Künstner, V.N. Polkovnikov, N.N. Salashchenko, F. Schäfers, S.D. Starikov. *High performance La/B4C multilayer mirrors with barrier layers for the next generation lithography* // Appl. Phys. Lett. 2013. V.1020. P.011602.