

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

Цыбина Николая Николаевича

«Многослойные абсорбционные фильтры для астрономии и проекционной литографии экстремального ультрафиолетового диапазона»,

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики.

Актуальность темы. В диссертационной работе идёт речь об абсорбционных тонкоплёночных фильтрах, используемых в тех ситуациях, когда необходимо отфильтровать излучение в мягком рентгеновском диапазоне. Зачастую они применяются в оптических системах с широкополосными источниками излучения, и задачей является подавление излучения в ультрафиолетовой, видимой и инфракрасной областях спектра. Актуальность темы диссертации не вызывает сомнений, она обусловлена применением фильтров в интенсивно развивающихся направлениях науки и техники - это солнечная внеатмосферная астрономия и проекционная литография в диапазоне мягкого рентгеновского излучения. Разрабатываемые фильтры предполагается использовать в космических обсерваториях, в которых наблюдение за Солнцем будет вестись с орбитальных станций и с внеземных орбит. Для таких экспериментов требуются тонкоплёночные фильтры, обладающие высокой радиационной стойкостью. Также в настоящее время рассматривается возможность применения тонкоплёночных структур для фильтрации излучения плазменных источников в установках проекционной литографии в диапазоне мягкого рентгеновского излучения. К источнику излучения предъявляются высокие требования на спектральный состав выходного излучения, так как литографический процесс подразумевает использование только узкого спектрального диапазона вблизи длины волны $\lambda = 13,5$ нм, в то время как используемые плазменные источники излучают в широком спектральном диапазоне – от мягкого рентгеновского до ближнего инфракрасного диапазона.

Общие сведения.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, основных результатов, списка цитируемой литературы и списка публикаций автора. Общий объем диссертации составляет 144 страницы, приведено 62 рисунка и 19 таблиц.

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, изложены цели работы, показана научная новизна и практическая значимость полученных результатов, формулируются основные положения, выносимые на защиту и личное участие автора диссертации.

Первая глава представляет собой литературный обзор по тонкоплёночным абсорбционным фильтрам. В главе рассматриваются основные характеристики плёночных фильтров, методики их изготовления и результаты по созданию тонкоплёночных абсорбционных фильтров для астрономии и проекционной литографии ЭУФ диапазона. Рассмотрены принципы выбора материала тонкоплёночных фильтров. Проведён анализ литературы, в которой рассматриваются свойства фильтров - механическая прочность, термическая, временная стабильность. Приводятся литературные данные о разработке спектральных фильтров с окнами прозрачности в диапазоне длин волн 9-110 нм для космических телескопов.

Вторая глава посвящена описанию применявшихся в диссертационной работе методов изготовления фильтров, и способов исследования свойств этих фильтров. Дано описание методики отделения плёнок от подложек с использованием "жертвенного" слоя. Приведено описание разработанных стендов для проведения испытаний тонкоплёночных

фильтров на механическую прочность и термическую стабильность. Приведено описание разработанного стенда для проведения длительного отжига свободновисящих плёнок.

Третья глава посвящена разработке многослойных спектральных фильтров для космических солнечных телескопов. Основное назначение фильтра – подавление интенсивного солнечного излучения в ультрафиолетовом, видимом и инфракрасном диапазонах при высоком пропускании на рабочих длинах волн в диапазоне мягкого рентгеновского.

Четвертая глава посвящена изучению термической стабильности тонкоплёночных фильтров для использования их в стендах проекционной литографии на длине волны 13,5 нм. Было проведено исследование с целью создания свободновисящих фильтров, обладающих высоким пропусканием на длине волны 13,5 нм (более 70%), с требуемой степенью подавления излучения в УФ (более чем в 20 раз в диапазоне длин волн 130-400 нм), видимом и ИК диапазоне (в 100 раз), обладающих необходимой механической прочностью и термической стабильностью.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций

Задачей диссертационной работы являлось развитие методов изготовления и изучение оптических, механических и термических свойств тонкоплёночных свободновисящих структур. Для её решения использовались как оригинальные подходы, так и известные методики исследования. Оригинальный подход, развиваемый автором, заключался в создании свободновисящего фильтра в виде многослойной периодической структуры. Большая часть работы посвящена определению оптимальных толщин и материалов слоёв, обеспечивающих высокое пропускание фильтра в диапазоне мягкого рентгеновского излучения при требуемой степени подавления длинноволновой части спектра, высокую механическую прочность и термическую стабильность фильтра. Диссертантом проанализированы достижения других коллективов в области создания тонкоплёночных абсорбционных фильтров. Список цитируемой литературы содержит 96 ссылок.

В ходе проведения исследований автором были получены следующие основные результаты.

1. Автором была разработана методика изготовления ультратонких свободновисящих плёнок большой апертуры. Установка магнетронного напыления для синтеза плёночных структур позволяет получать однородные свободновисящие плёнки с минимальным количеством микропроколов.

2. Автором разработан и изготовлен стенд для сравнительного тестирования прочности тонкоплёночных фильтров. Экспериментально продемонстрировано, что многослойные структуры, состоящие из чередующихся пар слоёв металла нанометровых толщин и укрепляющих прослоек выдерживают больший перепад давления, чем однослойные плёнки из того же металла при сопоставимой толщине.

3. Для астрономических исследований предложены и разработаны многослойные Zr/Si фильтры и Al/Si фильтры на поддерживающей сетке. Автором предложен способ крепления плёночной структуры к опорной поддерживающей сетке, при котором плёнка оказывается натянутой в ячейках сетки. Фильтры в виде натянутой в ячейках поддерживающей сетки многослойной плёнки обладают высокой вибростойкостью. Высокая надёжность такой конструкции фильтров продемонстрирована в предполётных испытаниях и в ходе ракетного эксперимента.

4. Для длительного изучения термической стойкости фильтров автором разработан и изготовлен стенд, в котором нагрев образцов в вакууме осуществляется за счёт тепла, выделяющегося в свободновисящей плёнке при пропускании через неё электрического тока. Проведено сравнительное изучение термической стабильности многослойных структур на основе комбинаций прозрачных на длине волны 13,5 нм материалов.

5. Автором было изучено влияние вакуумного нагрева на деградацию свойств структур Mo/ZrSi₂ с MoSi₂ защитными покрытиями фильтра при высоких тепловых нагрузках. Показано, что основной причиной ухудшения оптических свойств фильтра является проникновение в плёнку кислорода.

В диссертационной работе получены и другие интересные результаты. Все научные результаты подкреплены экспериментальным материалом, опубликованы в российских и международных журналах, представлялись на международных конференциях. Все научные результаты являются обоснованными.

Оценка новизны и достоверности

Полученные в диссертационной работе результаты являются новыми научными знаниями на стыке двух областей: физики тонких плёнок и рентгеновской оптики. Изучению процессов, происходящих при нагреве в многослойных покрытиях, посвящено большое число работ автора. Результаты, полученные диссертантом при исследовании процессов перемешивания и кристаллизации слоёв при нагреве в многослойных свободновисящих пленках, существенно дополняют накопленные ранее сведения. Впервые проведено сравнительное изучение термостойкости большого числа многослойных плёночных фильтров различного состава с высокой прозрачностью на длине волны 13,5 нм, что позволило найти наиболее термостойкую структуру для использования в высокопроизводительных установках проекционной литографии.

Достоверность результатов работы не вызывает сомнения и обеспечивается использованием современных средств исследований, подтверждается согласованностью экспериментальных данных с теоретическими представлениями и между собой.

По диссертационной работе имеются следующие замечания.

1. Одним из недостатков диссертации является недостаточная, на мой взгляд, проработка автором диссертации разделов связанных с позиционированием своей работы среди работ других исследователей. Недостаёт сравнения полученных автором диссертации результатов с мировым уровнем. Актуальность проводимых исследований не вызывает сомнений, это подтверждается востребованностью результатов работы, но давать ссылки 25-40 летней давности в разделе «Актуальность темы исследования» кажется странным.
2. В диссертации имеется незначительное количество грамматических, синтаксических и речевых ошибок.
3. Отсутствует заключение. В конце текста диссертации лишь перечисляются основные результаты работы. В заключении было бы уместным дополнительно подчеркнуть результаты, определяющие целостность диссертационной работы.
4. Иллюстративный материал в диссертации следовало бы подать более наглядно. Схемы установок приводятся в виде фотографий внешнего вида, на котором мало что можно разглядеть. В результате текстовое описание внутреннего устройства, например, напылительной установки, остаётся без иллюстративного сопровождения. В ряде случаев цветные фотографии намного бы упростили восприятие материала (рис. 2.3, 2.8, 2.9, 4.10 и др). В ряде случаев на фотографиях и микрофотографиях невозможно определить масштаб изображения (рис. 2.3, 2.8, 2.9, 4.10, 4.16, 4.18). На некоторых рисунках приведены подписи на английском языке.
5. В диссертации лишь вскользь упоминается о других способах фильтрации мягкого рентгеновского излучения. Например, существуют способы такой фильтрации с помощью напыления покрытий непосредственно на рентгеновские зеркала, разрабатываются способы фильтрации излучения при помощи профилирования отражающей поверхности зеркал. Необходимо приводить сравнение различных способов фильтрации.
6. К недостаткам диссертации можно отнести и феноменологический (описательный) характер изложения материала. Описываются методы получения тех или иных конкретных результатов, но недостаёт изложения сути вопроса с единых позиций.

Хотелось бы видеть научные выводы, претендующие на более или менее общее применение, а не только по отношению к данным материалам при данной технологии напыления.

Сделанные замечания не снижают высокую оценку работы. Диссертация Н.Н. Цыбина представляет собой законченную работу, в которой получен ряд новых результатов, имеющих научную и практическую значимость. Оценивая диссертацию в целом, следует отметить большой объём проведенных исследований. В работе развит новый подход, заключающийся в создании тонкоплёночных фильтров в виде многослойных структур, что придает им ряд уникальных свойств, в первую очередь высокую прочность. Несомненно, этот подход открывает перспективы по созданию новых оптических элементов на основе многослойных структур.

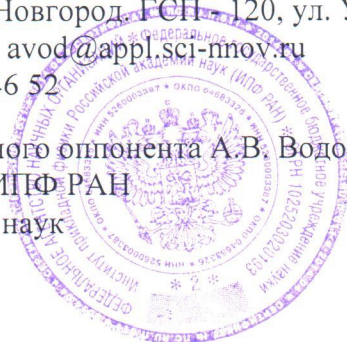
По теме диссертации опубликовано 43 печатных работы, в том числе 13 статей и 30 публикаций в сборниках тезисов докладов и трудов конференций и симпозиумов. Все основные результаты автора известны специалистам, докладывались на научных семинарах, российских и международных конференциях. Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации. Диссертационная работа Цыбина Николая Николаевича «Многослойные абсорбционные фильтры для астрономии и проекционной литографии экстремального ультрафиолетового диапазона» отвечает критериям п. 9-14 Положения о порядке присуждения учёных степеней, утверждённого Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям, представляемым на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук. Считаю, что Цыбин Николай Николаевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики.

Официальный оппонент

А.В. Водопьянов

Кандидат физико-математических наук
Заведующий лабораторией прикладной физики плазмы ИПФ РАН
603950, г. Нижний Новгород, ГСП – 120, ул. Ульянова, 46.
Электронная почта: avod@appl.sci-nnov.ru
Телефон (831) 416 46 52

Подпись официального оппонента А.В. Водопьянова заверяю
Учёный секретарь ИПФ РАН
Кандидат физ.-мат. наук



И.В. Корюкин

09 июня 2015 года