

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

Сочетание высокой прозрачности тонких металлических плёнок в области мягкого рентгеновского (МР) и экстремального ультрафиолетового (ЭУФ) излучения с высоким поглощением излучения ближнего ультрафиолетового, видимого и инфракрасного диапазонах длин волн делает их незаменимыми для спектральной фильтрации широкополосного излучения в экспериментах, где требуется регистрация МР и ЭУФ излучения широкополосных источников. Тонкоплёночные спектральные абсорбционные (по принципу действия) фильтры широко применяются в различных областях исследований, таких как метрология и спектроскопия источников МР и ЭУФ диапазона, рентгеновская астрономия (спектрографы, телескопы). Алюминиевые плёнки толщиной 0,2 мкм начали применяться в первых космических экспериментах в 50-х годах прошлого века, когда появилась возможность регистрации солнечного излучения в МР и ЭУФ диапазонах. Создание солнечных телескопов нового поколения, обладающих достаточно большой эффективной площадью и спектральной селективностью, высоким временным и пространственным разрешением, способностью к длительной работе в условиях космоса, потребовало разработки более эффективных спектральных фильтров (с более высоким рабочим пропусканием, более прочных и с высокой временной стабильностью). Кроме того, в новых проектах по наблюдению за Солнцем с околосолнечных орбит, где входная аппаратура будет испытывать высокие тепловые нагрузки, важным параметром входного фильтра становится его термическая стойкость. Одновременно, с развитием проекционной литографии на длине волны 13,5 нм, где в качестве источника ЭУФ излучения используется нагретая до высоких температур плазма, потребовались спектральные фильтры с высокой прозрачностью в рабочем диапазоне длин волн и выдерживающие длительное воздействие излучения большой средней мощности.

Тонкие металлические пленки пригодны для использования в качестве фильтров МР и ЭУФ излучения только при условии, что они закреплены на высокопрозрачных поддерживающих оправах. При этом свободностоящий фильтр должен обладать определенной механической прочностью, чтобы мог выдержать транспортировку и установку в вакуумный объем, а в случае применения в солнечных телескопах – вибрацию и акустические нагрузки, возникающие при выводе спутника на орбиту.

Работа Цыбина Н.Н. направлена на решение задачи, заключающейся в развитии методов изготовления и изучении свойств тонкоплёночных свободностоящих структур для создания на их основе абсорбционных фильтров, удовлетворяющих требованиям современной рентгеновской астрономии и проекционной литографии ЭУФ диапазона. В связи с этим работа является своевременной и актуальной.

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, приведена научная новизна и практическая значимость результатов, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, отражено личное участие автора.

В первой главе представлен подробный обзор о достижениях в области изготовления тонких свободновисящих пленок. Из обзора можно узнать о возникновении идеи использования тонких плёнок в качестве абсорбционных фильтров, о разнообразных методиках, применяющихся при изготовлении фильтров, изучении механической прочности, о способах контроля и борьбы с проколами в тонких пленках. В обзоре приводятся данные, характеризующие мировые достижения в разработке тонкоплёночных фильтров для солнечных телескопов и для первых стендов проекционной ЭУФ литографии. В конце главы представлен задел, имевшийся в ИФМ РАН на момент начала работы над диссертацией. Обзор дает представление об уровне знаний в выбранной области исследований, основных проблемах и недостатках применявшихся методов и подходов и позволяет оценить прогресс, достигнутый благодаря их развитию.

Вторая глава посвящена изложению основных принципов расчёта оптических характеристик фильтров, критериев выбора оптимального состава тонкоплёночных структур, описанию применявшихся при изучении механической прочности и термической стойкости фильтров стендов. Приведено описание собранной автором установки магнетронного напыления, и детально изложена усовершенствованная методика отделения пленок от подложек путем селективного травления металлического подслоя. Основным достоинством предложенной методики является получение фильтров большой площади с минимальным количеством проколов.

Приведены данные по исследованию механической прочности свободновисящих фильтров на круглом отверстии. Автором собран стенд, в котором измерялся предельный перепад давления между сторонами пленки, при котором происходил ее разрыв. Проведено сравнительное тестирование однородных металлических пленок и пленок, состоящих из периодически чередующихся пар слоев нанометровых толщин (слоя металла и прослойки). Показано, что такие многослойные пленки превосходят по прочности однослойные пленки из того же металла при одинаковой толщине.

Далее приводится описание собранного диссертантом стенда для проведения долговременных термических испытаний. Особенностью стенда является стабильность выделяемой в пленочном образце мощности в процессе нагрева, что важно для проведения сравнения термической стойкости фильтров разного состава.

В третьей главе представлены результаты разработки фильтров для телескопов солнечных обсерваторий. Для телескопов отечественной обсерватории ТЕСИС проведен поиск структур фильтров с высоким пропусканием на длинах волн 13,2 нм, 17,1 и 30,4 нм, обладающих высокой механической прочностью и требуемой степенью подавления видимого излучения (на уровне 10^{12} для системы фильтров). В результате проведенного предварительного теоретического расчета пропускания фильтров, с учетом технологической возможности изготовления и после изучения механических свойств, были определены следующие кандидаты: Zr/Si фильтры для канала регистрации 13,2 нм и Al/Si фильтры для каналов 17,1 и 30,4 нм. Входные фильтры представляли собой

многослойную пленку, приклеенную к сеточным секторам (шаг ячейки квадратной сетки 1,8 мм). Свободновисящая пленка перед приклейкой к секторам предварительно натягивалась по периметру отверстия рамки, в результате чего готовые образцы представляли собой натянутую в ячейках опорной сетки пленку. Следует подчеркнуть, что такая конструкция входных фильтров, обеспечивающая, при сравнительно высоких коэффициентах пропускания (более 20% с учетом сетки) на рабочих длинах волн, высокую стойкость к динамическим воздействиям и прочность, использовалась впервые.

Автором была изучена возможность создания фильтра на основе Mg, который по расчетным характеристикам эффективен на длинах волн за L краем поглощения ($\lambda=25$ нм) вплоть до 80 нм. Автору удалось разработать способ изготовления Mg-содержащих фильтров, заключающийся в напылении на тонкую свободновисящую пленку.

В четвертой главе исследуется влияние вакуумного нагрева на оптические свойства многослойных фильтров и проводится поиск наиболее термически стойкой структуры, обладающей пропусканием на длине волны 13,5 нм более 70% и с требуемым уровнем подавлением ультрафиолетового, видимого и ИК излучения длин волн. Помимо оптических свойств, к фильтру предъявляются дополнительные требования на механическую прочность: необходим свободновисящий фильтр большой площади, чтобы снизить тепловую нагрузку, приходящую на единицу поверхности фильтра, и при этом выдерживающий перепады давления, возникающие в процессе эксплуатации.

Показано, что при длительном вакуумном нагреве (давление остаточных газов $(1-5)\times 10^{-8}$ торр) Zr/Si фильтр выдерживает многочасовой нагрев при плотности поглощенной мощности $0,5$ Вт/см², что является порогом для данной структуры. При больших поглощенных мощностях происходит существенное уменьшение пропускания на рабочей длине волны и просветление в УФ и видимом и ИК, что, как было установлено, связано с проникновением кислорода в структуру. Продемонстрирована перспективность использования Ru и MoSi₂ покрытий.

Переходя к оценке диссертации в целом, следует отметить следующее. Автором были предложены, изготовлены и изучены тонкопленочные фильтры, удовлетворяющие требованиям, предъявляемые к спектральным фильтрам в современных солнечных телескопах и стендах проекционной ЭУФ литографии. В силу специфики объекта изучения – многослойной свободновисящей пленки с характерной толщиной 40-200 нм – возможно применение лишь ограниченного числа методов исследований, наиболее информативным из которых является метод вторично-ионной масс-спектрометрии. В ходе решения поставленных задач, автором проводился анализ проблем как на основе уже имеющихся собственных результатов, так и путем сопоставления их с исследованиями, известными из литературы, посвященных многослойным покрытиям.

Новизна подхода, развиваемого диссертантом, заключается в создании спектральных фильтров в виде многослойных структур и оптимизации толщин и состава слоев для получения желаемых свойств (оптических, механических, термических). Используя преимущества многослойных композиций, автором были улучшены прочностные свойства фильтров на поддерживающих сетках. Впервые систематически изучалась термическая стойкость многослойных тонкопленочных фильтров. Применение

силицидов в качестве барьерных слоев и защитных покрытий позволило повысить термическую стабильность фильтра для использования в литографических установках при сохранении оптических характеристик и механической прочности. Важно отметить, что реализованные подходы имеют универсальный характер и могут применяться при разработке спектральных фильтров на другие области длин волн МР и ЭУФ диапазона.

Достоверность и обоснованность результатов и положений, выносимых на защиту, определяется применением проверенных методов исследований, согласованностью результатов измерений, полученных различными методами, результатами калибровок и предполетных испытаний фильтров для солнечных ЭУФ телескопов.

Диссертация Н.Н. Цыбина не свободна от недостатков. Можно сделать следующие замечания. Идея многослойного состава фильтра является ключевой в работе, а потому на наш взгляд уделено мало внимание рассмотрению преимуществ этого подхода. В частности, из приведенных данных остается неясным, в чем причина такого упрочнения, зависит ли величина предельного перепада от материала прослойки. Для фильтров, используемых для нужд рентгеновской астрономии, крайне важными характеристиками, помимо исследованных автором, являются их долговременная стабильность, изменение их свойств под воздействием пучков низкоэнергичных ионов солнечного ветра и стойкость к термоциклированию, обусловленная циклами наблюдений вследствие заходов спутника в тень Земли на низких орбитах. Однако отсутствие этих данных в диссертации не снижает научной и практической ценности работы.

Основные результаты обсуждались на отечественных и зарубежных научных конференциях и симпозиумах, они опубликованы в рецензируемых журналах. Содержание автореферата соответствует диссертационной работе.

Диссертационная работа отвечает критериям п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней, а ее автор Цыбин Николай Николаевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики.

Официальный оппонент

С.В. Кузин

Доктор физико-математических наук
Заведующий лабораторией рентгеновской астрономии Солнца
Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН
119991 ГСП-1 г. Москва, Ленинский проспект, д.53.
Электронная почта: kuzin@sci.lebedev.ru
Телефон +7(499) 132-69-49

Подпись официального оппонента С.В. Кузина заверяю

Ученый секретарь ФИАН, д.ф.и.н.

Н.Г. Полухина

30 мая 2015 года

