

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д002.069.03,  
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
БЮДЖЕТНОГО НАУЧНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ «ФЕДЕРАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК» МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ, ПО  
ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА  
НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 17.12.2020 № 13

О присуждении Гарахину Сергею Александровичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Широкополосные рентгенооптические элементы на основе аперидических многослойных структур для солнечной астрономии и управления аттосекундными импульсами электромагнитного излучения» по специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики – принята к защите 05.10.2020 г. (протокол заседания № 7) диссертационным советом Д002.069.03, созданным на базе Федерального государственного бюджетного научного учреждения (ФГБНУ) «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, 603950 г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46, приказ о создании диссертационного совета номер 670/нк от 30 июня 2017 года.

Соискатель Гарахин Сергей Александрович, 1992 года рождения, в 2016 году окончил Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» по направлению «Электроника и наноэлектроника», освоил программу подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре Института физики микроструктур РАН (срок обучения

01.09.2016 – 31.08.2020), работает в должности младшего научного сотрудника отдела многослойной рентгеновской оптики Института физики микроструктур РАН – филиала ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Диссертация выполнена в отделе многослойной рентгеновской оптики Института физики микроструктур РАН – филиала ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, Чхало Николай Иванович, заведующий отделом многослойной рентгеновской оптики Института физики микроструктур РАН – филиала ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Официальные оппоненты:

1. **Рагозин Евгений Николаевич**, доктор физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Физический институт имени П. Н. Лебедева РАН»,

2. **Трушин Владимир Николаевич**, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»,

**дали положительные отзывы** на диссертацию.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук – в своем **положительном отзыве**, составленном и подписанном Николенко Антоном Дмитриевичем, кандидатом физико-математических наук, старшим научным сотрудником сектора 8-21 Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, указала, что «В диссертации впервые проведено сравнение рентгенооптических свойств аperiодических и стековых структур с близкими спектральными полосами

пропускания и показано преимущество стековых структур по сравнению с аperiodическими. ... Впервые изучена в широких пределах зависимость плотности  $M_0$  от толщины слоя. Показана необходимость учета изменения плотности при расчете структуры широкополосного зеркала. ... Созданы широкополосные зеркала стекового типа с рекордно большой, до 33 нм, рабочей длиной волны». В конце отзыва делается заключение, что диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая удовлетворяет требованиям, установленным «Положением о порядке присуждения ученых степеней» № 842 от 24.09.2013 г. и предъявляемым к кандидатским диссертациям, и что С. А. Гарахин, безусловно, заслуживает присвоения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – «Приборы и методы экспериментальной физики».

Соискатель имеет 17 опубликованных работ по теме диссертации в рецензируемых научных журналах и 24 тезиса конференций. Наиболее значительные работы:

1. Chkhalo, N.I. Conversion efficiency of a laser-plasma source based on a Xe jet in the vicinity of a wavelength of 11 nm / N.I. Chkhalo, S. A. Garakhin, A. Ya. Lopatin, A. N. Nechay, A. E. Pestov, V. N. Polkovnikov, N. N. Salashchenko, N. N. Tsybin, and S. Yu. Zuev // AIP Advances. - 2018. No.8, P.105003.
2. Барышева, М.М. Сравнение подходов в изготовлении широкополосных зеркал для ЭУФ диапазона: аperiodические и стековые структуры / М.М. Барышева, С.А. Гарахин, С.Ю. Зуев, В.Н. Полковников, Н.Н. Салащенко, М.В. Свечников, Н.И. Чхало, С. Юлин // Квант. Электроника. - 2019. Т.49, № 4, С. 380-385.
3. Garakhin, S.A. High-resolution laboratory reflectometer for the study of x-ray optical elements in the soft and extreme ultraviolet wavelength ranges / S. A. Garakhin, N. I. Chkhalo, I. A. Kas'kov, A. Ya. Lopatin, I. V. Malyshev, A. N. Nechay, A. E. Pestov, V. N. Polkovnikov, N. N. Salashchenko, M. V. Svechnikov, N. N. Tsybin, I. G. Zabrodin, and S. Yu. Zuev // Rev. Sci. Instrum. - 2020. Vol.91, Issue 6, 063103.

4. Chkhalo, N.I. A double-stream Xe:He jet plasma emission in the vicinity of 6.7 nm wavelength / N.I. Chkhalo, S.A. Garakhin, S.V. Golubev, A.Ya. Lopatin, A.N. Nechay, A.E. Pestov, N.N. Salashchenko, M.N. Toropov, N.N. Tsybin, A.V. Vodopyanov, S. Yulin // Applied Physics Letters. - 2018. Vol.112, Issue 22, P.221101

Недостовверные сведения об опубликованных соискателем работах в диссертации отсутствуют. Личный вклад соискателя в опубликованные по теме диссертации работы является определяющим.

На автореферат диссертации поступили 3 отзыва (**все положительные**):

1) **Горай Леонид Иванович**, доктор физико-математических наук, проф. каф. фотоники Академического университета им. Ж.И. Алферова, в своем отзыве на автореферат диссертации подчеркивает, что «... работа является, несомненно, актуальной и практически значимой, отмечает разработку и изготовление рефлектометра и экспериментальных методик для аттестации рентгенооптических элементов». **Отзыв не содержит замечаний.**

2) **Бушуев Владимир Алексеевич**, доктор физико-математических наук, профессор кафедры физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, в своем отзыве дает положительную оценку автореферата, который «...изложен с исчерпывающей полнотой и ясностью, наиболее интересными с практической точки зрения являются разработанные методы расчета и синтеза стековых структур». **Замечания: 1.** Желательно все-таки более конкретно указать, что значит “правильно подобранная фаза” (стр. 11). **2.** Для большей наглядности и убедительности первого из основных результатов диссертации следовало бы привести на рис. 4 для сравнения со стековой структурой результаты также и для аперидического многослойного зеркала.

3) **Пунегов Василий Ильич**, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Физико-математического института ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, отмечает: «... к заслуге соискателя относится разработанный рефлектометр на основе лазерно-плазменного источника рентгеновского излучения и монохроматора Черни-Тернера... следует особо отметить, что разработанные и исследованные широкополосные стековые зеркала Mo/Si

могут быть использованы для спектрогелиографов солнечной обсерватории КОРТЕС». **Замечания: 1.** В названии диссертации отсутствует термин "стековые зеркала", хотя именно этой проблеме в большей степени посвящена работа. **2.** Следует с осторожностью вводить новые физические понятия. В частности, я не встречал названия "нанооптика", хотя возможно оно существует, "фемтооптика", что приемлемо для рентгеновских лазеров на свободных электронах, поэтому введение термина "аттооптика" необходимо всесторонне обосновать.

Выбор ведущей организации и официальных оппонентов обосновывается тематической близостью диссертационного исследования соискателя и их научных исследований, посвященных изучению рентгеновской оптики (ведущая организация - 6 публикаций, оппонент Трушин В. Н. - 4 публикации и 5 патентов, оппонент Рагозин Е. Н. - 18 публикации, за последние 5 лет).

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

**Предложена и реализована** на практике методика реконструкции внутреннего строения стековых структур по данным угловой зависимости коэффициента отражения на длине волны 0,154 нм и по спектральной кривой отражения в ЭУФ диапазоне. Предложенная методика в разы ускорила процесс изготовления широкополосного зеркала с близкими к расчетным параметрам. **Проведено** сравнение рентгенооптических свойств аperiodических и стековых многослойных широкополосных структур с близкими спектральными полосами пропускания. Показано преимущество стековых структур по сравнению с аperiodическими. **Созданы** широкополосные зеркала стекового типа с рекордно большой, до 33 нм, рабочей длиной волны.

**Изучено** влияние структурных дефектов АМЗ, таких как межслоевая шероховатость, отличие плотности пленок от табличных значений, а также случайного отклонения толщин слоев от расчетных значений на форму и длительность отраженного chirпированного импульса электромагнитного излучения аттосекундной длительности. **Изучена** в широких пределах

зависимость плотности молибденовых пленок от их толщины. **Показана** необходимость учета изменения плотности Мо при расчете структуры широкополосного Mo/Si зеркала.

**Теоретическая значимость** исследования заключается в анализе влияния флуктуаций толщин, плотностей пленок и межслоевой шероховатости на амплитуду и фазу комплексного коэффициента отражения зеркала, а также на форму и длительность отраженных от АМЗ аттосекундных чирпированных импульсов электромагнитного излучения. Развита методика реконструкции толщин пленок в стековых широкополосных многослойных зеркалах по данным рентгеновского отражения.

**Значение полученных соискателем результатов исследования для практики:**

- Экспериментально показано преимущество применения стековых структур по сравнению с аперидическими для создания широкополосных зеркал для ЭУФ диапазона. Стековая структура содержит значительно меньше слоев различной толщины, чем аперидическая, поэтому для калибровки толщин пленок требуется меньше времени.
- Показано, что для стековых зеркал можно решить обратную задачу реконструкции толщин пленок изготовленной структуры по данным рентгеновского отражения. Это позволяет скорректировать технологический процесс и всего за несколько итераций добиться хорошего согласования теории и эксперимента.
- Продемонстрирована необходимость учета реальных значений плотности Мо пленок и шероховатости межслоевых границ при расчете конструкции широкополосных Mo/Si зеркал. Использование экспериментальных значений шероховатости и плотности позволило снизить количество оптимизируемых параметров при расчете аперидических многослойных зеркал.
- Разработанный рефлектометр с лазерно-плазменным источником и монохроматором Черни-Тернера позволяет исследовать коэффициенты отражения, рассеяния и пропускания практически всех типов

рентгенооптических элементов с размерами от единиц до 500 мм в диапазоне длин волн 5-60 нм.

**Оценка достоверности результатов исследования выявила:**

– достоверность результатов работы обеспечена адекватным выбором теоретических и практических методов, использованных для оптимизации, синтеза и аттестации исследуемых многослойных систем.

– результаты работы хорошо согласуются с известными в литературе экспериментами и результатами, проведенными в синхротронных центрах.

**Личный вклад соискателя:** Основные результаты, представленные в рассмотренной диссертационной работе, были получены автором лично, либо при его непосредственном участии. Постановка цели и задач диссертационного исследования, интерпретация полученных результатов и формулировка выводов осуществлены совместно с научным руководителем.

На заседании 17.12.2020 г. диссертационный совет принял решение присудить Гарахину С.А. учёную степень кандидата физико-математических наук.

При проведении открытого голосования диссертационный совет в количестве 18 человек, из них 6 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации (01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики), участвовавших в заседании, из 25 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за 18, против 0, неголосовавших 0.

Заместитель председателя диссертационного совета

Красильник З.Ф.

Ученый секретарь диссертационного совета

Водолазов Д.Ю.

Дата оформления Заключения 17.12.2020 г.

