

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 003.016.03
НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО
УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ИНСТИТУТА ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ им. Г. И.
БУДКЕРА СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ
НАУК, подведомственного Федеральному агентству научных организаций,
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 18.09.2018 № 3

О присуждении **НАЗЬМОВУ ВЛАДИМИРУ ПЕТРОВИЧУ** ученой
степени доктора физико-математических наук.

Диссертация «Литографическая широкоапертурная рефракционная рентгеновская оптика» по специальности **01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики** принята к защите 24.05.2018 г., протокол № 2 диссертационным советом Д 003.016.03 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, ФАНО России, 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11, созданного приказом Минобрнауки России № 385/нк от 27. 04. 2017 г.

Соискатель Назьмов Владимир Петрович 1957 года рождения, в настоящее время работает старшим научным сотрудником сектора 8-21 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, ФАНО России.

Диссертацию на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук *«Исследование воздействия синхротронного излучения на толстые слои полимерных материалов в процессах формирования микроструктур с высоким аспектным отношением»* защитил в 1999 году в диссертационном совете, созданном на базе Института неорганической химии им. Николаева СО РАН.

Диссертация выполнена в секторе 8-21 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, ФАНО России.

Официальные оппоненты:

- 1. АСАДЧИКОВ Виктор Евгеньевич** – доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное учреждение «Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук», г. Москва, заведующий лабораторией рефлектометрии и малоуглового рассеяния;
- 2. ПАВЕЛЬЕВ Владимир Сергеевич** – доктор физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева", г. Самара, заведующий кафедрой нанотехнологий;

3. ЧХАЛО Николай Иванович - доктор физико-математических наук, Институт физики микроструктур РАН филиал ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики РАН», заведующий Отделом многослойной рентгеновской оптики

дали **положительные** отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение науки **ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ ИМ. А.В. РЖАНОВА СО РАН**, г. Новосибирск в **своем положительном заключении**, подписанном Шкляевым Александром Андреевичем доктором физико-математических наук, ведущим научным сотрудником лаборатории нанодиагностики и нанолитографии и Настаушевым Юрием Владимировичем кандидатом физико-математических наук, старшим научным сотрудником лаборатории нанодиагностики и нанолитографии указала, что диссертация В.П.Назьмова является целенаправленным исследованием, в результате которого созданы основы нового направления в физике и технологии приборов – рентгеновских широкоапертурных линз для рентгеновских микроскопов, телескопов, монохроматоров, наноанализаторов материалов. Диссертация В.П.Назьмова отвечает всем требованиям и критериям, предъявляемым к работам на соискание учёной степени доктора физико-математических наук в соответствии с Положением о присуждении учёных степеней, утверждённым постановлением Правительства Российской Федерации, а её автор заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.01. – приборы и методы экспериментальной физики.

Соискателем опубликованы 111 работ, в том числе по теме диссертации 67 работ, из них в рецензируемых научных изданиях 58 работ.

Научные работы соискателя отличаются новизной и неординарностью подхода. В них содержится как элемент теории, так и экспериментальная проверка выведенных теоретически закономерностей, положений, что убеждает в правильности выбора явления или взаимосвязи явлений, ответственных за наблюдаемый (измеряемый) результат. В подавляющем большинстве работ авторский вклад является определяющим, поскольку автор сам старается оптимизировать эксперимент по проверке авторских идей и предварительно аналитически проанализировать ожидаемые результаты. Большинство работ носит направленный характер, хотя результаты могут быть использованы значительно шире. Зачастую автором для демонстрации описываемого явления используется его наглядная визуализация в виде фотографий состояния объекта воздействия или процесса. Объём каждой научной работы, в основном, не превышает 10 страниц журнального текста.

Наиболее значимые работы автора следующие:

1. Nazmov V.P., et al. Modelling and manufacture of regular microstructures with high aspect ratio in acrylic plastic // NIM A. 2000. Vol.448, №1-2. P.493-496.
2. Nazmov V., et al. Kinoform X-ray lens creation in polymer materials by deep X-ray lithography // NIM B. 2004. Vol. 217, №3. P.409-416.
3. Nazmov V., et al. Refractive lenses fabricated by deep SR lithography and LIGA technology for X-ray energies from 1 keV to 1 MeV // AIP Conf. Proc., 2004, Vol. 705, P.752-755.

4. Nazmov V., et al. Planar sets of cross x-ray refractive lenses from SU-8 polymer // Proc. SPIE. 2004. Vol.5539. P. 235-243.
5. Nazmov V., et al. Crossed planar X-ray lenses made from nickel for X-ray micro focusing and imaging applications // NIM A. 2007. Vol.582. P.120-122.
6. Nazmov V., et al. Reflectivity test of X-ray mirrors for deep X-ray lithography // Microsys. Technol. 2008. Vol.14, no.9-11. P.1299-1303
7. Nazmov V., et al. Visualization of the development process in deep X-ray lithography // NIM A. 2009. Vol.603. P.153-156.
8. Nazmov V., et al. Investigation of the radiation-induced thermal flexure of an x-ray lithography mask during a tilted exposure // Journ.Vac. Sci. Technol. B. 2011. Vol.29. P.011007.
9. Nazmov V., et al. Polymer refractive crossed long lens: a new optical component for nanoimaging and nanofocussing in the hard X-ray region // Journ. Instr. 2012. Vol.7. P.P07019.
10. Nazmov V., et al. Mosaic-like micropillar array for hard X-ray focusing - one-dimensional version // Journ. Micromech. Microeng. 2013. Vol.23, no.9. P.095015.
11. Fukui H., ..., Nazmov V., et al. Large-aperture refractive lenses for momentum-resolved spectroscopy with hard X-rays // Journ. Synch. Rad. 2013. Vol.20, Pt. 4. P.591-595.
12. Nazmov V., et al. Multi-field x-ray microscope based on array of refractive lenses // Journ. Micromech. Microeng. 2014. Vol.24, no.7. P.075005.
13. Marschall F., ..., Nazmov V., et al. X-ray full field microscopy at 30 keV // Journ. Phys.: Conf. Ser. 2014. Vol.499. P.012007.
14. Nazmov V., et al. Development and characterization of ultra high aspect ratio microstructures made by ultra deep X-ray lithography // Journ. Mater. Process. Technol. 2015. Vol.225. P.170-177.
15. Nazmov V., et al. Modified X-ray polymer refractive cross lens with adiabatic contraction and its realization // Journ. Micromech. Microeng. 2015. Vol.25, no.5. P.055010.
16. Nazmov V., et al. A method of mechanical stabilization of ultra-high-AR microstructures // Journ. Mater. Process. Technol. 2016. Vol.231. P.319-325.
17. Nazmov V., et al. Large-aperture two-dimensional x-ray refractive mosaic lenses // Appl. Opt. 2016. Vol.55. P.7138-7141.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

- от Королькова Виктора Павловича доктора технических наук, и.о. заместителя директора по научной работе, заведующего лабораторией дифракционной оптики Института Автоматики и Электростроения СО РАН, в которой отмечается, что «...Рассматриваемую диссертационную работу можно отнести к междисциплинарным, поскольку она перекрывает целый пласт исследований в области создания и исследования микросистемных приборов. Назьмов В.П. продемонстрировал знание методологии решения физических задач, начиная с постановки задачи, моделирования, изготовления физического объекта исследования и заканчивая собственно исследованием его свойств и анализом результатов. Результаты моделирования подтверждены экспериментально, в том числе, посредством рентгенооптических изображений, представленных в

диссертации. Автором пройден путь от концепции рентгенолитографической рентгеновской оптики до её реализации через расчёт и оптимизацию дизайна, изготовление рентгеновских масок, формирование толстых слоёв рентгенорезиста, облучение и проявление скрытого изображения, постановку экспериментов по тестированию изготовленных элементов преломляющей оптики и анализ результатов. Положения и результаты, выносимые на защиту, обладают научно-технической новизной, которая базируется как на уникальности объекта исследования, так и метода его создания. Результаты работы в виде конечного продукта используются в экспериментах и приносят реальную пользу. Поэтому диссертация представляет как научный, так и практический интерес. Тем не менее, работа не лишена погрешностей. Например, часто упоминается малоизвестный термин «рентгеновский пропагатор линзы», определения которого в тексте не представлено. Необходимо отметить устаревший способ подачи защищаемых положений типа «Метод ...», «Модель ...» без указания специфических особенностей предлагаемого метода. Это приводит к тому, что, например, следующий диссертант не сможет вынести на защиту иной «Метод формирования механической стабилизации для ультравысоких структур с ультравысоким аспектным отношением» пусть даже намного более эффективный. То есть автор отрезал своей диссертацией возможность дальнейшего проведения исследований в данном направлении и вынесения их результатов на защиту в диссертации. Но данное замечание скорее следует отнести к работе совета, где защищается диссертация...В целом, работа соответствует требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям по специальности 01.04.01, а автор заслуживает присвоения ему искомой учёной степени.»

- от Семёнова Александра Александровича кандидата химических наук, главного эксперта Акционерного общества «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов им. Академика А.А.Бочвара», руководителя проекта «Рентгеновская оптика», в которой указывается, что «...Диссертационная работа Назьмова В.П. посвящена актуальной теме разработки нового типа рентгеновской оптики. Рентгенооптические устройства, разработанные автором, предназначены для инструментальной фокусировки и управления параметрами потока рентгеновского и синхротронного излучения. Они могут найти широкое применение в лабораторных аналитических и измерительных системах неразрушающих измерений сложных структур и объектов, в устройствах рентгеновского и специального приборостроения, на рабочих станциях синхротронов, в каналах синхротронного излучения. Удачная научно-практическая методология, заложенная в основу разработанных диссертантом оптических устройств, создаёт предпосылки их использования ведущими мировыми научными центрами в области развития синхротронных исследований, в том числе при проектировании современных синхротронов 3-го и перспективного 4-го поколений. Изящные технические решения, предложенные и использованные автором, позволяют надеяться, что разработанные им литографические устройства рефракционной рентгеновской оптики будут недороги и достаточно доступны широкому кругу специалистов...Без существенных замечаний...Диссертационная работа Назьмова В.П. должна быть высоко оценена как качественный научный труд, имеющий предпосылки продолжения, дополнения, развития...Соискатель выполнил работу,

которая по актуальности выбранной темы, новизне полученных результатов и их практической значимости полностью удовлетворяет требованиям «Положения ...о порядке присуждения учёных степеней...», а её автор Назьмов В.П. достоин присвоения ему учёной степени доктора физ.-мат. наук по специальности 01.04.01.

Выбор **официальных оппонентов и ведущей организации** обосновывается известностью их достижений в отрасли физико-математических наук, их компетентностью, наличием публикаций по теме защищаемой диссертации и способностью определить научную и практическую ценность защищаемой диссертации, а также дать рекомендации по использованию полученных в ней результатов.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

Разработаны

- методика формирования толстых полимерных слоёв практически неограниченной толщины, базирующаяся на использовании операции сушки слоя;
- новая методика измерения температуры мембраны путём формирования отпечатка с неё, позволившая установить, что при нагреве мощным пучком рентгеновского излучения выпуклая часть мембраны рентгеновской маски касается подложки;
- новый метод измерения размера фокуса, т.н. голомографический, не требующий высокоточных трансляторов и изготовления с высокой точностью ножевых структур;
- метод формирования поддерживающего субслоя или нескольких субслоёв, способствующих механической устойчивости микроструктур с ультравысоким аспектным отношением;
- а также экспериментально испытан многопольный рентгеновский микроскоп, обеспечивающий одновременно изображение в нескольких полях зрения;

предложены

- на базе метода математического моделирования - оригинальный подход, обеспечивающий возможность формирования однородных слоёв полимерного резиста неограниченной толщины за относительно короткое время;

доказано экспериментально, что планарные линзы и системы линз могут применяться для 1D - и 2D-нанофокусировки рентгеновского излучения, передачи рентгеновских изображений с точностью не хуже пространственного разрешения, обеспечиваемого каждой из линз, а также в качестве конденсоров рентгеновского излучения

введено

- понятие акцептанса элементов рентгеновской оптики, и рефракционных линз в частности, для более полной характеристики свойств последних;
- понятие LIG-оптики.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

- изложено и проведено математическое моделирование рефракционной линзы с мозаичной компоновкой, характеризующее её как переходную между чисто преломляющей и частично поглощающей излучение, а также адиабатической рефракционной линзы с мозаичной компоновкой элементов, обеспечивающей размер фокуса порядка 1 нм в диапазоне энергий квантов 10-20 кэВ;

- показано, что в области энергий квантов более 100 кэВ преломляющие линзы LIG-оптики имеют значительные перспективы по сравнению с другими видами рентгеновской оптики;

изучена радиационная устойчивость преломляющих линз из полимерного материала, показана перспективность его использования в пучках интенсивного (после монохроматора) синхротронного излучения и настольных рентгеновских источников;

проведена модернизация

- математической модели рефракционной линзы с адиабатическим сужением с целью её адаптации к планарной технологии.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

разработана и внедрена (вплоть до изготовления мелких серий рефракционных рентгеновских линз) полная технологическая цепочка производства рефракционных LIG-линз.

Определен

эмпирически и численным моделированием - закон потери массы от времени при испарении разбавителя из толстого слоя раствора фотополимера (фоторезиста SU-8) и зависимость коэффициента диффузии разбавителя от остаточной концентрации последнего в слое;

Создан на базе мозаичных рефракционных линз рентгеновский монохроматор со степенью монохроматизации, сравнимой с таковой для монохроматора на базе многослойных зеркал.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

для экспериментальных работ

использовано стандартное сертифицированное оборудование, осуществлены необходимые калибровки, обеспечивающие воспроизводимость результатов и взаимосогласованность последних, полученных в различных условиях;

теория

- рефракционной линзы с мозаичной компоновкой преломляющих элементов подтверждена соответствующими экспериментами;

идея базируется

- на анализе и обобщении информации членов сообщества пользователей синхротронного излучения, являющихся ведущими специалистами в мире в областях микроструктурирования посредством рентгеновского излучения, а также рентгеновской микроскопии и микротомографии с использованием синхротронного излучения

установлено

- хорошее совпадение между измеренной величиной дисперсии рентгеновского излучения рефракционными линзами с мозаичной компоновкой и её теоретическим предсказанием, известным из литературы;
- хорошее согласие между измеренной длиной фокусного расстояния для рефракционных линз с мозаичной компоновкой и приведённым в литературе аналитическим выражением для линз с параболическим профилем;
- экспериментально, что угол смачивания облучённого полимера SU-8 в растворителе PGMEA значительно отличается от нуля (8 градусов), каковым он считался ранее в научно-технической литературе;

- экспериментально, что числовая апертура рефракционной линзы с мозаичной компоновкой может во много раз превышать угол полного внутреннего отражения материала (линзы), что ранее вызывало дискуссию в литературе вследствие невысокой точности экспериментальных результатов, опубликованных другими исследователями;

использованы современные программы обработки и анализа 2-х мерных рентгеновских изображений.

Личный вклад соискателя состоит в: предложении идей по расширению апертуры рефракционных линз; реализации высказанных идей путём модернизации имеющейся технологии; проведении необходимых расчётов спектра СИ, доз поглощённого излучения, моделирования условий формирования толстых слоёв и их облучения, численного моделирования распределения интенсивности рентгеновского излучения в апертуре и за пределами оптических элементов; изготовлении рентгеновских масок и линз; проведении экспериментов по тестированию изготовленной рентгеновской оптики и радиационной стойкости материалов; обработке результатов экспериментов и анализе ожидаемых результатов; подготовке публикаций.

На заседании 18.09.2018 г. диссертационный совет принял решение присудить **Назьмову Владимиру Петровичу** ученую степень **доктора физико-математических наук**.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 18 человек, из них 5 докторов наук по специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики, участвовавших в заседании, из 24 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за - 18, против - 0, недействительных бюллетеней - 0.

Председатель диссертационного
совета Д 003 016 03,
д. ф.-м. н.



/ А. А. Иванов /

Ученый секретарь диссертационного
совета Д 003 016 03,
д. ф.-м. н.

/ П. А. Багрянский /

21. 09. 2018 г.