

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

о диссертации ГИЖИ СЕРГЕЯ СЕРГЕЕВИЧА «**Анализ и фильтрация рентгеновских спектров с помощью призмной алмазной оптики и мозаичных кристаллов**», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 – оптика.

Рентгеновское излучение широко применяется для исследования различных свойств веществ и материалов, в частности, для определения структурных параметров, химического состава, плотности дефектов, характеристик химической связи и др. В то же время оптические схемы, используемые для реализации многих рентгеноспектральных методов, на сегодняшний день не отвечают потребностям эксперимента. Так, большинство применяемых в рентгеновской рефлектометрии схем предполагают значительное время проведения эксперимента, что практически не позволяет осуществлять исследование кинетики процессов. В наиболее быстрых схемах с коллимированным полихроматическим пучком и энергодисперсионным детектором реализуется достаточно низкое энергетическое разрешение. Несколько иная проблема характерна для методов рентгеноспектрального химического анализа, например, в рентгенофлуоресцентном анализе. В этом случае существенен фон, ограничивающий предел обнаружения, обусловленный рассеянием используемого для возбуждения аналитического сигнала в большинстве лабораторных установок полихроматического рентгеновского излучения. Применяемые в настоящее время абсорбционные фильтры и вторичные мишени недостаточно эффективны.

В рецензируемой диссертационной работе приведены результаты изучения дисперсии полихроматического рентгеновского излучения и фильтрации полихроматического излучения при дифракции на мозаичных кристаллах. На основе результатов этих исследований автор показывает возможность создания призмной дисперсионной схемы для рентгеновской рефлектометрии, позволяющей снизить время проведения измерений на несколько порядков по сравнению с традиционной гониометрической схемой. Применение мозаичных кристаллов алмаза, текстур пирографита позволяет существенно улучшить процессы фильтрации, в частности, получать от лабораторных источников интенсивные пучки поляризованного монохроматического излучения. Совокупность этих результатов позволяет в перспективе создать рентгенооптические схемы исследовательских спектрометров нового поколения, отличающихся от действующих высоким временным и спектральным разрешением, и аналитические спектрометры с низким уровнем фона.

Учитывая сказанное, **считаю диссертацию С.С. Гижы актуальной**, а сам факт выполнения данной работы исключительно **своевременным**.

Диссертация С.С. Гижы имеет традиционное построение: состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, содержащего 89 источников. Работа изложена на 104 страницах текста.

Во введении (стр. 7 – 16) дана общая характеристика работы, обоснована актуальность, сформулированы цель и задачи диссертации, научная новизна и практическая значимость, дана характеристика личного вклада автора, приведены положения, выносимые на защиту. Во введении также представлен список Российских и Международных конференций, на которых были доложены результаты диссертации и список работ автора, в которых опубликованы результаты диссертации.

Первая глава (стр. 17-30) представляет собой обзор литературы по теме диссертации. На основе критического анализа литературы (в обзоре рассмотрен 71 источник) автором дана оценка современного состояния и сформулированы задачи диссертационной работы.

Во второй главе (стр. 31-52) приведены результаты исследования интерференционных картин, возникающих при прохождении рентгеновского пучка через алмазную призму, и результаты исследований с использованием для рефлектометрии призмного рентгеновского спектрометра. Автором экспериментально обнаружено появление своеобразной интерференционной картины, аналогичной по структуре осцилляций краевому дифракционному эффекту и дана убедительная интерпретация наблюдаемого явления, основанная на учете монотонной неплоскостности полированной алмазной пластины. Далее автор анализирует возможности использования реальной полированной пластины в качестве диспергирующего элемента. Существенным в этой части работы является наблюдение, что для рентгеновских пучков с малыми геометрическими размерами возможно смягчить требования к обработке поверхности – достаточно, чтобы требования по отклонению преломляющей грани призмы были выполнены не по всей поверхности, а только вдоль проекции пучка на преломляющую грань призмы. Это позволило путем выбора соответствующего направления прохождения пучка через призму использовать в качестве диспергирующего элемента алмазные призмы с уровнем полировки, существующим на сегодняшний день. Возможность такого выбора подтверждена экспериментально. С использованием полученных результатов автором реализована энергодисперсионная схема рентгеновской рефлектометрии с алмазной призмой и проведены исследования бислойной структур С-Ni на кремниевой подложке и пленок железа и никеля на кремниевой подложке. Схема продемонстрировала возможность

проведения измерений за время 1 – 10 с. Правильность полученных результатов с новой схемой подтверждена данными традиционной гониометрической рефлектометрии.

Третья глава (стр. 53-77) посвящена применению мозаичных структур для повышения чувствительности рентгенофлуоресцентного анализа. Автором предложено два подхода к улучшению характеристик рентгенофлуоресцентного анализа. Первое, применение режекторных фильтров на основе мозаичных кристаллов, что позволяет, более, чем на порядок улучшить отношение сигнал/шум. Второе, использование дифракционного отражения (113) от мозаичного кристалла алмаза для эффективной монохроматизации и поляризации линии меди $CuK\alpha$, что, в свою очередь, на 1-2 порядка снижает уровень рассеянного излучения.

В четвертой главе (стр. 78-93) предложены экспериментальные схемы, обеспечивающие эффективную фильтрацию спектра прошедшего через образец излучения, а также процедура обработки данных, повышающая точность измерений содержания примесей методом рентгеновской спектрометрии скачков поглощения.

В заключении (стр. 94-95) сформулированы основные результаты диссертации.

Все полученные в диссертации научные результаты являются **новыми**. Среди новых результатов данной диссертации **считаю необходимым выделить следующие:**

1. Экспериментальное обнаружение и интерпретация интерференционной картины, возникающей при прохождении рентгеновского пучка через алмазную призму.

2. Разработка и реализация дисперсионной схемы на базе алмазной оптики для анализа спектров рентгеновского отражения в диапазоне 6-20 кэВ м энергетическим разрешением около 10 эВ ($E=10$ кэВ), позволившей существенно увеличить временное разрешение.

3. Реализация с помощью мозаичных кристаллов алмаза (ориентация отражающих плоскостей (113) и капиллярной оптики получения интенсивных поляризованных монохроматических пучков в лабораторных условиях на линии $CuK\alpha$.

4. Реализация высокоэффективной режекторной фильтрации с использованием высокоориентированного пиролитического графита.

Достоверность результатов диссертации не вызывает сомнений, поскольку они подтверждены данными экспериментов, выполненных диссертантом, корректными теоретическими оценками, сравнением с имеющимися литературными данными.

Практическая ценность результатов данной диссертации заключается в том, что предложенные автором рентгенооптические схемы могут быть использованы в научных приборах следующего поколения с улучшенными характеристиками: временным и

энергетическим разрешением (рефлектометрия), снижением предела обнаружения (рентгеноспектральный анализ).

Автореферат диссертации правильно и достаточно полно отражает ее содержание.

Основные результаты диссертации опубликованы. По материалам диссертации опубликовано 7 научных статей в журналах, индексируемых в базах WOS и Scopus (X-ray Spectrometry, Письма в ЖЭТФ, Письма в ЖТФ, Известия РАН, серия физическая), 1 научная статья в журнале, входящим в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени доктора и кандидата наук». Результаты работы неоднократно докладывались на Всероссийских и Международных конференциях (опубликовано 5 тезисов докладов).

В работе имеются **отдельные недостатки:**

1. Некоторые разделы отличаются излишней краткостью изложения. Так, например, п. 4.2.2. (стр.87-89) изложен слишком конспективно, в частности, нет полного описания алгоритма решения обратной задачи, не указан вид аппаратной функции спектрометра.

2. Неясно, почему на стр.77 автор, обсуждая возможности возбуждения линий флуоресценции излучением $CuK\alpha$, ограничивается только K -и L -сериями (тогда получается граничный элемент диспрозий). Но у следующего элемента – гольмия -- $M\gamma$ -край поглощения 1,351 кэВ, т.е. возможно возбуждение флуоресцентных линий M -серии вплоть до лоуренсия ($M\gamma$ -край поглощения 4,86 кэВ), если, конечно, проводить измерения в вакууме.

Отмеченные недостатки носят частный характер и не затрагивают существа основных положений диссертации, выносимых на защиту и не могут повлиять на общую высокую оценку работы.

Диссертация С.С. Гижи **соответствует специальности 01.04.05** – «Оптика». Представленные в диссертации результаты относятся к области исследований, предусмотренной пунктом 1 Паспорта специальности 01.04.05: «Волновая (физическая) оптика. Интерференция, дифракция, поляризация, когерентность света. Формирование световых пучков. Оптика анизотропных, движущихся и нестационарных сред, металлооптика. Формирование и обработка оптических изображений, топография. Оптика световодов», и соответствует отрасли наук «физико-математические науки».

Диссертация С.С. Гижи является законченной научно-квалификационной работой, **содержащей решение задачи** – установление закономерностей дисперсии полихроматического рентгеновского излучения при прохождении через алмазную призму

и фильтрации рентгеновского излучения при дифракции на мозаичных кристаллах, имеющей важное значение для оптики рентгеновского диапазона спектра.

Диссертация С.С. Гижи **удовлетворяет требованиям п. 9** «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. N 842, а также **требованиям пп. 10-14** указанного Положения.

Автор работы – Сергей Сергеевич Гижа– **заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 - «оптика».**

Официальный оппонент

Филиппов Михаил Николаевич,

заведующий лабораторией химического анализа

Федерального государственного бюджетного учреждения науки

Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова

Российской академии наук,

доктор физико-математических наук, профессор.

Почтовый адрес: 119991, Москва, Ленинский проспект, 31.

Телефон: +7(495) 633-85-09.

Адрес электронной почты: fil@igic.ras.ru

Филиппов М.Н.

23 ноября 2018 г.

Подпись руки тов. Филиппова

УДОСТОВЕРЯЮ

Зав. канцелярией ИОНХ РАН



Труды официального оппонента М.Н. Филиппова по теме диссертации С.С. Гижы "Анализ и фильтрация рентгеновских спектров с помощью призмной алмазной оптики и мозаичных кристаллов"

1. Filippov M.N., Gavrilenko V.P., Mityukhlyaev V.B., Rakov A.V., Todua P.A. Novel method for dimensional measurements of nanoreliefelements based on electron probe defocusing in a scanning electron microscope. Measurement Science and Technology 2014, Vol. 25, No 4, P. 044088. DOI: 10.1088/0957-0233/25/4/044008.
2. V. P. Gavrilenko, D. A. Karabanov, A. Yu. Kuzin, V. Mityukhlyaev, A. A. Mikhutkin, P. A. Todua, M. N. Filippov, T. Baimukhametov, A. L. Vasil'ev. Three-Dimensional Reconstruction of the Surfaces of Relief Structures from Stereoscopic Images Obtained in a Scanning Electron Microscope. Measurement Techniques. 2015. Vol. 58. Issue 3, pp 256–260. DOI:10.1007/s11018-015-0695-1.
3. V. P. Gavrilenko, A. V. Zablotskii, S. A. Korneichuk, A. Yu. Kuzin, T. A. Kupriyanova, O. I. Lyamina, P. A. Todua, M.N. Filippov, V. Ya. Shklover. Measurement of Structural Parameters Based on X-Ray Emission Spectra with Energy-Dispersive Detection. Measurement Techniques 2016. Vol. 59. Issue 2, pp 198–201. DOI:10.1007/s11018-016-0942-0.
4. S. A. Darznez, A. Yu. Kuzin, V. Mityukhlyaev, M. A. Stepovich, P. A. Todua, M.N. Filippov. Measurement of the Thickness Nonuniformity of Nanofilms Using an Electron Probe Method. Measurement Techniques 2016. Vol. 59. Issue 8, pp 822–825. DOI:10.1007/s11018-016-1051-9.
5. Дарзнез С.А., Митюхляев В.Б., Тодуа П.А., Филиппов М.Н. Электронно-зондовый рентгеноспектральный анализ нанопленок при наклонном падении пучка электронов// Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2017. Т. 83. № 9. С. 5-9.