

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Гижы Сергея Сергеевича «Анализ и фильтрация рентгеновских спектров с помощью призменной алмазной оптики и мозаичных кристаллов», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 – «Оптика»

Диссертационная работа Гижы Сергея Сергеевича посвящена исследованиям структурных и рентгенооптических характеристик кристаллов алмаза и ВПГ, с целью разработки на их основе диспергирующих и фильтрующих элементов для спектрометрических схем, и выяснения возможности использования алмазной оптики для разработки методов быстрой и высокочувствительной энергодисперсионной спектрометрии. Подобные исследования являются необходимым этапом для успешной разработки бесконтактных методов изучения быстропротекающих процессов, возникающих при интенсивном внешнем воздействии пучками частиц и квантов.

Разработка подобных методов быстрой рентгеновской спектрометрии и структурного анализа, позволяющих в режиме "online" контролировать структурные и фазовые изменения материалов является актуальной. Они должны быть эффективными как для развития технологий по изменению характеристик материалов посредством их облучения фемто-, пико- и наносекундными импульсами потоков квантов и заряженных частиц, так и при изучении динамики фазовых переходов в сегнетоэлектриках и пироэлектриках. При этом, упомянутые выше элементы алмазной оптики должны быть дополнены высокоэффективными системами детектирования излучения (1D - либо 2D - детекторами), которые реализуются в настоящее время с использованием 1D p-i-n GaAs детекторов, но в перспективе могут быть реализованы также и на алмазных материалах. Все это говорит о неперенной актуальности темы диссертации Сергея Гижы, имеющей научное и прикладное значение. Для достижения указанных целей диссертантом был решен ряд задач, связанных с исследованием дифракционных явлений, возникающих при отражении монохроматических рентгеновских излучений от ВПГ и синтетических кристаллов алмаза, а также при их прохождении через алмазную призму. Им также выполнены методологические исследования особенностей интерференционных картин отражения полихроматических рентгеновских излучений от тонкопленочных структур с известными параметрами.

При выполнении перечисленных задач диссертантом разработан ряд методов, реализованных в экспериментальных измерительных стендах. Среди них:

-метод и стенд для изучения спектральной режекции первичных спектров с помощью ВПГ и зеркальных фильтров, что несомненно важно для разработки полосовых фильтров широкополосных рентгеновских излучений;

-метод и стенд для исследований эффектов поляризации и монохроматизации первичного излучения с использованием крупноблочных кристаллов алмаза и поликапиллярной оптики.

Результаты выше перечисленных исследований изложены в диссертации Сергея Гижы, которая состоит из введения, четырех глав, заключения и обширного списка цитируемой литературы.

Во введении сформулированы цели и задачи работы, обоснованы её актуальность, научная новизна и достоверность результатов, а также значимость работы. Здесь же сформулированы положения, выносимые на защиту, представлена информация по апробации результатов диссертации и приведен список опубликованных по теме диссертации научных работ.

В первой главе рассмотрены особенности взаимодействия рентгеновского излучения с веществом, приведено описание монохроматоров из высокоориентированного пиролитического графита, описаны принципы использования алмазной призмы в рентгеновском диапазоне. Дано описание методов рентгеновской рефлектометрии, метода рентгенофлуоресцентного анализа, рассмотрена специфика рентгеновских методов и области различных их применений.

Во второй главе представлены результаты исследований спектрометрических возможностей алмазной рентгеновской призмы. Излагается способ оптимизации спектрального разрешения при использовании неидеальной призмной рентгеновской оптики для задач разложения в спектр пучков с характерными размерами в несколько десятков микрон. Представлен экспериментальный материал по интерференции проходящего через алмазную призму монохроматического пучка. Выполнены и представлены расчеты, объясняющие наблюдаемые особенности в интерференции параболическим отклонением преломляющей грани призмы от плоскости. Продемонстрирована чувствительность интерференционных картин к фазовым возмущениям. В данной главе представлены также схема и результаты измерений, выполненные методом быстрой энергодисперсионной рефлектометрии с использованием призмной алмазной оптики. В частности, продемонстрированы интерференционные кривые отражения от тонкопленочных структур полученные в широком спектральном



диапазоне за времена порядка 1 – 10 минут. Реализовано значительное повышение оперативности диагностики, так как классическими методами те же результаты могут быть получены лишь за времена  $\sim 1$  ч. В завершении главы рассмотрены требования к характеристикам источника рентгеновского излучения, которые, при использовании указанной методики, позволяют ожидать уменьшение времени измерений вплоть до  $\sim 1$  нс.

Третья глава диссертации посвящена исследованию структурных свойств мозаичных кристаллов, возможности их применений в качестве рентгеновских спектральных фильтров и поляризаторов. В частности, исследована азимутальная анизотропия коэффициента отражения от пленок высокоориентированного пиролитического графита, резко возрастающая при уменьшении диаметра зондирующего пучка. Показано, что пленки пиролитического графита могут быть эффективно применены в качестве полосовых фильтров, выполняющих режекцию широких спектральных полос из первичного полихроматического пучка. Это продемонстрировано на примере вырезания спектральной полосы в области флуоресцентных линий L-серии атомов свинца. В этой главе также показано, что мозаичные кристаллы алмаза с ориентацией плоскостей (311) вместе с поликапиллярной рентгеновской оптикой позволяют создавать интенсивные поляризованные пучки на линии  $\text{CuK}_\alpha$ . Приведены экспериментальные данные, показывающие возможность практического применения таких пучков для проведения высокочувствительного рентгенофлуоресцентного анализа.

В четвертой главе диссертации экспериментально изучена возможность измерения содержания элементов в исследуемых объектах при помощи анализа величины скачков рентгеновского фотопоглощения, зарегистрированных энергодисперсионным методом. В лабораторных условиях экспериментов были использованы системы рентгеновских зеркал, абсорбционные фильтры и полосовые фильтры из пленок высокоориентированного пиролитического графита. Решена обратная задача по восстановлению исходной формы скачка фотопоглощения. Показано, что использованный подход позволяет достичь чувствительности в десятки ppm.

В заключении диссертации сформулированы основные выводы по результатам работы, имеющие научную и практическую значимость. Значимость результатов подтверждается публикациями работ в широко цитируемых журналах (например, в журналах индексируемых в Web of Science и Scopus - 7 статей, в журналах из перечня ВАК - 1 статья), достаточно широкой апробацией выполненных работ на конференциях (тезисы докладов в сборниках 5-ти научных конференций), и

в других научных изданиях (две работы). Тематика представленных в диссертации работ соответствует специальности 01.04.05 – «Оптика».

Таким образом, новизна, научная значимость и практическую ценность работы не вызывает сомнений. Разработанные методы быстрого дисперсионного анализа и полосовой фильтрации рентгеновских спектров могут быть использованы в фундаментальных и прикладных исследованиях, проводящихся с использованием современного инструментария, в том числе с использованием рентгеновских лазеров на свободных электронах.

Достоверность экспериментальных результатов подтверждается их воспроизводимостью, а обоснованность интерпретаций - непротиворечивостью полученных результатов базовых физическим теориям и результатам численного моделирования.

Замеченные недостатки диссертационной работы:

1. Для демонстрации сравнительной эффективности предложенного в работе полосового фильтра, эффектно было бы в параграфе 3.2.5. (рис 3.7) привести экспериментальные данные, полученные при использовании абсорбционного графитового фильтра аналогичной толщины.
2. В работе (параграф 2.2.6) даны оценки допустимых радиационных нагрузок на алмазную призму при быстрых импульсных измерениях. В силу того, что в работе делается значительный акцент на неразрушающих измерениях, то такие же оценки допустимых нагрузок полезно было бы сделать и для объектов исследований, особенно если таковыми являются массивы наноструктур.

Указанные недостатки не умаляют значимости работы и полученных результатов. Диссертационная работа Сергея Сергеевича Гизи удовлетворяет всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 года, и диссертант заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 – «Оптика».

Официальный оппонент:

Профессор кафедры квантовой физики и  
наноэлектроники факультета электроники

и компьютерных технологий МИЭТ,  
доктор физико-математических наук  
Ильичев Эдуард Анатольевич

«20» ноября 2018 г.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники»,

124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, дом 1.

e-mail: edil44@mail.ru; тел: 8 - (499) 731-98-43

Подпись д.ф.м.н. Ильичева Э.А. заверяю,  
начальник отдела кадров НИУ МИЭТ



С.В. Заболотный

«20» ноября 2018 г.



Список основных публикаций официального оппонента Ильичева Эдуарда Анатольевича по теме защищаемой диссертации Гижы Сергея Сергеевича «Анализ и фильтрация рентгеновских спектров с помощью призменной алмазной оптики и мозаичных кристаллов», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 – «Оптика» в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

п/п	Название публикации	Вид	Издание (журнал)	Объем, стр.	Соавторы
1	Method for the formation of grapheme films.	Статья	Technical Physics, 2014, v.59, No.7, p.1007-1011	4 с.	Е.Р.Kirilenko, G. N. Petrukhin, G. S. Rychkov, O. A. Sakharov, Yu.V. Shchekin.
2	Исследование технологий формирования наноструктурированных эмиссионных сред для радиочастотной электроники.	Статья	Известия высших учебных заведений. Электроника. №4 (108), 2014, С.27-35.	9 с.	В.А. Беспалов, Е.П. Кириленко, А.И. Козлитин, и др.
3	Особенности формирования графеновых слоев из аморфных углеродных и кремний – углеродных пленок.	Статья	Письма в ЖТФ, 2014, Т.40, №2, С.10-15	6 с.	Е.П. Кириленко, Г.С. Рычков, и др.
4	«Терагерцовая электроника. Автоэммиттеры на основе алмазных микроконусов и графена».	Статья	Электроника, №2 (00133), 2014, С.13-19.	7 с.	А.Е. Кулешов, Р.М. Набиев, и др.
5	Field-Emission Diodes Based on Semiconductor–Polycrystalline Diamond Heterojunctions.	Статья	Technical Physics, 2014, Vol. 59, No. 10, pp. 1531–1535.	5 с.	V.A. Bepalov, A.E. Kuleshov, D.M. Migunov, R.M. Nabiev, G.N. Petrukhin, G.S. Rychkov, O.A. Sakharov, Yu.V. Shcherbini.
6	Desing and Invetigation of UV Image Detectors	Статья	ZhurnalTehnich eskoifiziki, 2015, V.85, No.4, p.74-82.	9 с.	V.A.Bepalov, V.M.Glazov,
7	Автоэмиссионные диоды на основе гетеропереходов полупроводник-поликристаллический алмаз.	Статья	Журнал технической физики, 2014, Т.84, В.10, С.112-116.	5 с.	В.А. Беспалов А.Е. Кулешов Р.М. Набиев, и др.

8	Способ формирования графеновых пленок	Статья	ЖТФ, 2014, Т.84, В.7, С.62-66	5 с.	Е.П.Кириленко, Г.Н.Петрухин, Г.С.Рычков, и др.
9	Терагерцовая электроника. Автоэмиттеры на основе алмазных микроконусов и графена	Статья	Электроника, 2014, Спецвыпуск (00137), С.143–155.	13 с.	Кулешов А., Набиев Р.М., Петрухин Г. Рычков Г.С., Чернявская Е.С.
10	Особенности формирования графеновых слоев из аморфных углеродных и кремний-углеродных пленок.//	Статья	Письма в ЖТФ, 2014, Т.40, В.2, С.10 - 15.	6 с.	Е.П. Кириленко, Г.Н. Петрухин, Г.С. Рычков, О.А. Сахаров, и др.
11	Разработка и исследование приемников изображений ультрафиолетового диапазона	Статья	Журнал технической физики, 2015, т.85, в.4, с.74-82	9 с.	Беспалов В.А., Глазов В.М., Куклев С.В., и др.
12	Evolution of properties in composite carbon films under thermal conditions and in the presence of a catalyst	Статья	Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2016, V. 10, N. 4, P. 753–757.	5 с.	BelyaevS.N., KirpilenkoG.G., KirilenkoE.P., GoryachevA.V.
13	Фотоэмиссионная ячейка матричного приемника вакуумного ультрафиолетового излучения.	Статья	Письма в ЖТФ. 2017, Т.43, В.7, С.48-55	8 с.	А.Е. Кулешов, Р.М. Набиев, Г.Н. Петрухин, Г.С. Рычков, Е.Г. Теверовская.
14	Эволюция свойств композитных углеродных пленок при термических воздействиях, в том числе в присутствии катализатора.	Статья	Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2016, выпуск 7, с.27-35	9 с.	Г.Г. Кирпиленко, А.В.Горячев, Е.П.Кириленко, и др.
15	Фотоэмиссионная ячейка матричного приемника вакуумного ультрафиолетового излучения.	Статья	Письма в ЖТФ. 2017, Т.43, В.7, С.48-55	8 с.	А.Е. Кулешов, Р.М. Набиев, Г.Н. Петрухин, Г.С. Рычков, Е.Г. Теверовская.