

На правах рукописи



Чижова Екатерина Викторовна

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ СХЕМЫ
РЕНТГЕНОФЛУОРЕСЦЕНТНОГО МИКРОАНАЛИЗАТОРА**

01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2013

Работа выполнена в ЗАО «Научные приборы».

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук Николаев Валерий Иванович

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,
профессор, СПбГЭТУ (ЛЭТИ),
кафедра электронных приборов
и устройств

Брытов Игорь Александрович

кандидат физико-математических наук,
ЗАО «Комита»,
зам. Генерального директора по науке

Серебряков Александр Сергеевич

Ведущая организация:

Санкт-Петербургский государственный
университет

Защита состоится « 5 » апреля 2013 г. в 15⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 002.034.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Института аналитического приборостроения РАН по адресу: 198095, г. Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, 31–33.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института аналитического приборостроения РАН по адресу: 190103, г. Санкт-Петербург, Рижский пр., 26.

Автореферат разослан « 26 » февраля 2013 г.

Ученый секретарь Диссертационного Совета
доктор физико-математических наук



А.Л. Буляница

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Метод рентгенофлуоресцентного микроанализа (микро-РФА) является одним из современных направлений в развитии традиционного метода рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) – неразрушающего аналитического метода определения химического состава вещества. Отличительной особенностью метода микро-РФА является возможность определения элементного состава малого объема вещества в приповерхностной области материалов – проведение локального элементного анализа и элементного картирования поверхности объектов. Метод получил быстрое развитие в течение последнего десятилетия благодаря появлению капиллярной рентгеновской оптики. Применение в качестве источника первичного излучения рентгеновских трубок и современных капиллярных систем для фокусировки излучения позволяет реализовать компактные схемы микро-РФА, на основе которых создаются серийные приборы для научных и промышленных целей.

На настоящий момент времени микро-РФА является хорошо обоснованным аналитическим методом, нашедшим применение в различных областях науки и производства. В мире оборудование для микро-РФА выпускает ряд приборостроительных компаний. Актуальной задачей является улучшение аналитических характеристик метода. Это, в частности, может быть достигнуто обеспечением оптимальных условий возбуждения и регистрации характеристического излучения анализируемых объектов. Из-за многообразия факторов, влияющих на результаты анализа, экспериментальное определение оптимальных параметров рентгенооптической схемы может быть затруднено, поэтому наиболее эффективно оптимизацию можно провести на основании математического моделирования работы анализатора.

Целью работы является обоснование принципов построения оптимальной схемы рентгенофлуоресцентного микроанализатора на основе

физико-математического моделирования его работы. Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

1. Проанализированы тенденции развития метода микро-РФА.

2. С опорой на физико-математические модели процессов рентгеновской флуоресценции проведено моделирование работы рентгенофлуоресцентного микроанализатора.

3. Обоснованы оптимальные параметры схемы рентгенофлуоресцентного микроанализатора, обеспечивающие минимальные пределы обнаружения анализируемых элементов и повышение разрешающей способности.

4. Оценены метрологические характеристики рентгеноспектрального анализа методом фундаментальных параметров.

5. Продемонстрированы аналитические возможности микроанализатора.

Корректность модели рентгенофлуоресцентного микроанализатора проверялась с использованием как теоретических, так и экспериментальных исследований. Количественные аналитические результаты получены при анализе стандартных образцов ювелирных сплавов на основе золота с аттестованными значениями содержаний элементов и их погрешностей.

Для приборной реализации метода микро-РФА были получены результаты, определяющие научную новизну исследований:

– разработан новый способ для формирования рентгеновского микрозонда на основе микрофокусного рентгеновского источника, диафрагмы и поликапиллярной рентгеновской линзы, позволяющий уменьшить расходимость рентгеновского пучка;

– предложен и обоснован набор фильтров первичного рентгеновского излучения для рентгенофлуоресцентного микроанализатора;

– впервые оптимизирована геометрия рентгенооптической схемы рентгенофлуоресцентного микроанализатора, что позволило обеспечить минимальные пределы обнаружения анализируемых элементов и повышение пространственной локальности метода.

Практическая значимость.

Предложен подход, позволяющий путем расчетов и моделирования всех элементов и систем рентгенофлуоресцентного микроанализатора создавать оптимальные рентгенооптические схемы приборов для микро-РФА с заданными параметрами. Полученные в работе результаты использовались в ЗАО «Научные приборы» при создании рентгеновского аналитического микрозонда-микроскопа «РАМ-30μ», предназначенного для исследований объектов методами оптической микроскопии, локального элементного микроанализа, проведения элементного картирования и рентгенографических исследований, что подтверждено актом внедрения.

Положения, выносимые на защиту:

1. Подход на основе моделирования работы рентгенофлуоресцентного микроанализатора, позволяющий улучшить пределы обнаружения анализируемых элементов путем оптимизации рентгенооптической схемы.

2. Метод расчета параметров сопряжения элементов системы формирования рентгеновского микрозонда на основе микрофокусного рентгеновского источника и поликапиллярной рентгеновской линзы, включающий моделирование расходимости и интенсивности первичного рентгеновского потока.

3. Новый способ формирования рентгеновского микрозонда переменного размера с малой расходимостью пучка рентгеновских лучей с использованием комбинации «диафрагма – поликапиллярная линза».

4. Результаты элементного картирования объектов различной природы и приближенно-количественного анализа ювелирных сплавов на основе золота нестандартным рентгеноспектральным методом на разработанном рентгеновском аналитическом микрозонде-микроскопе «РАМ-30μ».

Апробация результатов работы.

Результаты диссертационной работы были представлены в виде устных и стендовых докладов на Третьем Всероссийском форуме студентов, аспирантов

и молодых ученых «Наука и инновации в технических университетах» (Санкт-Петербург, 28-30 октября 2009 г.); Конференции (Школе-семинаре) по физике и астрономии для молодых ученых Санкт-Петербурга и Северо-Запада «Физика. СПб» (Санкт-Петербург, 29-30 октября 2009 г.); Fachtagung Prozessnahe Röntgenanalytik PRORA 2009 (Berlin, November 26-27, 2009, Germany); Второй международной научно-практической конференции «Измерения в современном мире – 2009» (Санкт-Петербург, 8-10 декабря 2009 г.); II Всероссийской научной конференции «Научное творчество XXI века» с международным участием (интернет-форум <http://nkras.forum24.ru/>, Красноярск, март 2010 г.); XX Всероссийской конференции «Рентгеновские и электронные спектры и химическая связь» (Новосибирск, 24-27 мая 2010 г.); VII Всероссийской конференции по рентгеноспектральному анализу (Новосибирск, 19-23 сентября 2011 г.); XL Международной научно-практической конференции «Неделя науки СПб ГПУ» (Санкт-Петербург, 5-10 декабря 2011 г.); IV Всероссийской конференции «Аналитические приборы» (Санкт-Петербург, 26-30 июня 2012 г.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 16 печатных работ, из них 5 статей в журналах, входящих в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий ВАК РФ (1 из которых – аналитических обзор), 10 тезисов докладов на всероссийских и международных конференциях и семинарах, 1 патент РФ. Список работ приведен в конце автореферата.

Структура и объем работы. Содержание диссертации изложено на 137 страницах и состоит из введения, пяти глав, разбитых на параграфы, заключения, списка литературы, содержащего 138 наименований, и приложения (акт внедрения). Работа содержит 17 таблиц и иллюстрирована 49 рисунками.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи работы, определены научная новизна и практическая значимость работы, выделены основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** дан обзор отечественной и зарубежной литературы по теме диссертации. Приведены характеристики современного рентгенофлуоресцентного оборудования для микроанализа. Определены тенденции развития количественного микро-РФА. Описан метод трехмерного рентгенофлуоресцентного микроанализа. Рассмотрены основные традиционные подходы, применяемые для оптимизации параметров рентгенофлуоресцентных анализаторов. Поставлены задачи исследований.

Вторая глава посвящена теоретическому обоснованию модели рентгенофлуоресцентного микроанализатора. Цель создания модели определена необходимостью разработки подхода, позволяющего на основе моделирования работы микроанализатора определять оптимальные параметры элементов и систем его рентгенооптической схемы. В модели используются известные математические выражения, описывающие физические процессы рентгенофлуоресцентного анализа.

Среди известных факторов, влияющих на результаты анализа и связанных с параметрами рентгенооптической схемы, можно выделить:

- параметры системы формирования рентгеновского микрозонда (материал анода рентгеновской трубки, характеристики рентгеновской оптики);
- использование системы фильтрации рентгеновского излучения;
- геометрия рентгенооптической схемы (углы возбуждения и отбора флуоресцентного излучения, расстояния между элементами схемы);
- параметры системы детектирования;
- использование системы вакуумирования или обдува гелием области анализа для регистрации легких элементов.

Ключевым моментом в приборной реализации метода микро-РФА является разработка оптимальной системы фокусировки первичного рентгеновского излучения от источника. Для определения параметров сопряжения элементов системы формирования рентгеновского микронда предложена модель, позволяющая оценить расходимость и интенсивность потока первичного рентгеновского излучения на выходе рентгеновской трубки.

Для оценки изменения характеристик сфокусированного первичного рентгеновского потока в рентгенофлуоресцентном микроанализаторе на основе данных о коэффициенте усиления рентгеновской линзы предложена модель пропускания линзы.

С целью определения оптимальных условий возбуждения, позволяющих получить максимальную интенсивность флуоресценции анализируемых элементов при минимальном фоне рассеянного излучения, рассмотрена модель фильтрации первичного излучения.

В третьей главе обосновывается выбор оптимальных параметров рентгенооптической схемы рентгенофлуоресцентного микроанализатора. На

основе модели возбуждения рентгеновской флуоресценции в монохроматическом приближении проведено обоснование выбора материала анода рентгеновской трубки. С использованием данных технических и физических характеристик рентгеновской трубки и

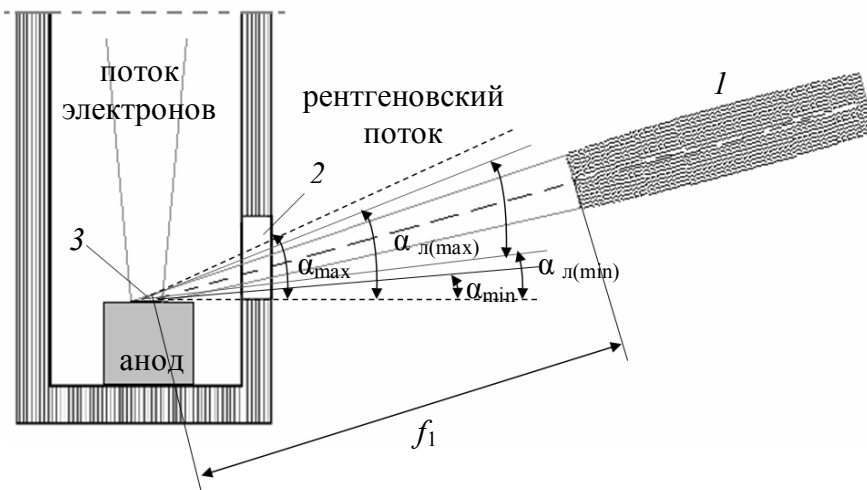


Рисунок 1 – Область сопряжения поликапиллярной рентгеновской линзы с рентгеновской трубкой от $\alpha_{л(\min)}$ до $\alpha_{л(\max)}$.

Значения углов: $\alpha_{\min} = 6^\circ$, $\alpha_{\max} = 18^\circ$;

$\alpha_{л(\min)} = 9^\circ$; $\alpha_{л(\max)} = 15^\circ$;

f_1 – переднее фокусное расстояние линзы

поликапиллярной линзы, а также закономерностей распределения потока рентгеновского излучения рассчитаны параметры сопряжения элементов системы формирования рентгеновского микронзонда. Описано изменение характеристик первичного рентгеновского потока при изменении угла отбора излучения и применении поликапиллярной рентгеновской линзы. На основе результатов моделирования определено оптимальное расположение поликапиллярной линзы (1) относительно центральной оси выходного окна рентгеновской трубки (2) (см. рисунок 1). Фокусы системы «рентгеновская трубка – поликапиллярная линза» (3) совмещаются с помощью системы юстировки.

Показано, что при изменении угла отбора излучения можно достичь увеличения относительной интенсивности потока на выходе линзы.

Смоделирована энергетическая зависимость системы «рентгеновская трубка – поликапиллярная линза».

Для выбора оптимальных параметров системы фильтрации первичного рентгеновского излучения решена задача расчета условий фильтрации с последующей экспериментальной проверкой результатов. На основании ряда теоретических расчетов предложен набор первичных фильтров для рентгенофлуоресцентного микроанализатора (см. таблицу 1).

Таблица 1 – Оптимальные параметры фильтров

Материал фильтра	Толщина фильтра, мкм	Назначение
Al	20	регистрация K, Ca, Ti, V
	100	уменьшение загрузки детектора
ПВХ	100	фильтр-мишень для возбуждения легких элементов
Ti	10	регистрация Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn
Ni	20	регистрация Zn-As, Pb, Bi
Cu	40	снижение фона для эффективной регистрации As, Br, Au, Pb
	100	
Zr	50	регистрация Rh-Cd
Nb	20	снижение фона для эффективной регистрации Sb, Sn
Ag	20	регистрация Zr, Mo

Для оптимизации канала детектирования рентгенофлуоресцентного излучения проведен расчет геометрии рентгенооптической схемы на основе моделирования концентрационной чувствительности при изменении значений углов отбора характеристического излучения. Для ряда элементов в легкой матрице теоретически оценены значения контрастности аналитических линий.

В четвертой главе для повышения пространственной разрешающей способности микроанализатора описана и опробована система фокусировки первичного рентгеновского излучения от источника на основе комбинации «диафрагма – поликапиллярная линза» (рисунок 2). Для реализации этого подхода на входе поликапиллярной линзы устанавливается диафрагма или коллиматор, ограничивающие рабочую область линзы. Уменьшая размеры диафрагмы перед линзой ($d_3 \rightarrow d_1$), можно повышать пространственную локальность метода за счет уменьшения расходимости первичного излучения.

Такая система позволяет сформировать микрозонд переменного размера D с малой расходимостью пучка рентгеновских лучей, что, в свою очередь, оптимизирует процесс настройки прибора при исследовании объектов различных размеров.

Для повышения эффективности регистрации легких элементов предложено вакуумирование измерительной камеры. Обоснован выбор параметров детектора.

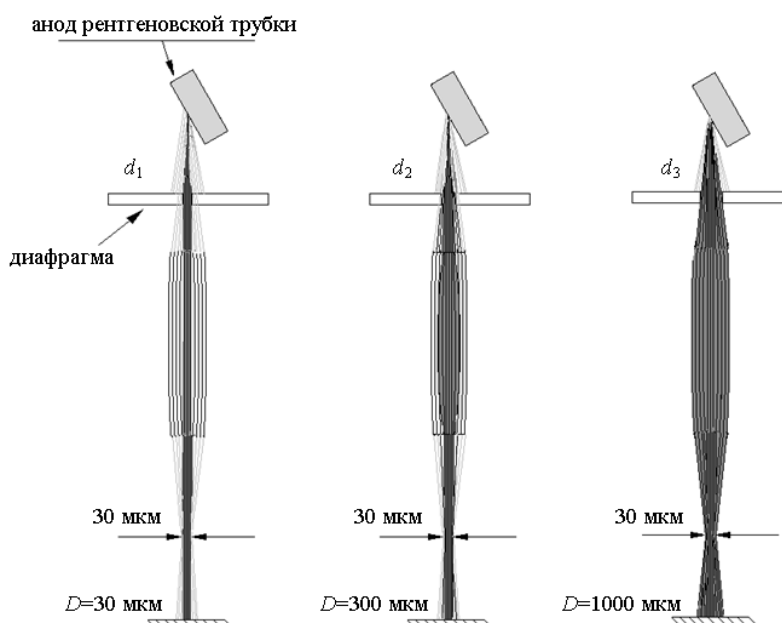


Рисунок 2 – Формирование слаборасходящихся рентгеновских зондов разного диаметра с помощью комбинации «диафрагма – линза»

Проведена оценка корректности работы канала регистрации рентгенографических изображений.

Определен вариант реализации системы фокусировки на объект исследования с совмещением осей рентгеновского и оптического каналов с помощью зеркала, отражающего излучение в видимом диапазоне и прозрачного для рентгеновского излучения. Проведен поиск наиболее подходящего полимерного материала для изготовления подложки зеркала.

Пятая глава посвящена определению аналитических возможностей рентгенофлуоресцентного микроанализатора и его практическому применению.

На основе предложенного подхода разработана рентгенооптическая схема рентгенофлуоресцентного микроанализатора, представленная на рисунке 3.

На выходном окне рентгеновской трубки (1) смонтирована система формирования рентгеновского микрозонда, включающая блок сменных диафрагм (2) и поликапиллярную рентгеновскую линзу (3) с устройством для юстировки (на рисунке 3 не показано).

Для оптимизации условий возбуждения флуоресценции предусмотрен блок сменных фильтров первичного излучения (4). В зависимости от требуемой локальности анализа и размера исследуемого объекта исследуемый образец (5) устанавливается на предметном столе (6) либо в фокусе поликапиллярной линзы, либо за фокусом линзы в расходящейся части потока рентгеновского излучения. Выбор области анализа и визуальный контроль в процессе анализа осуществляется с помощью цифровой видеокамеры (7) и

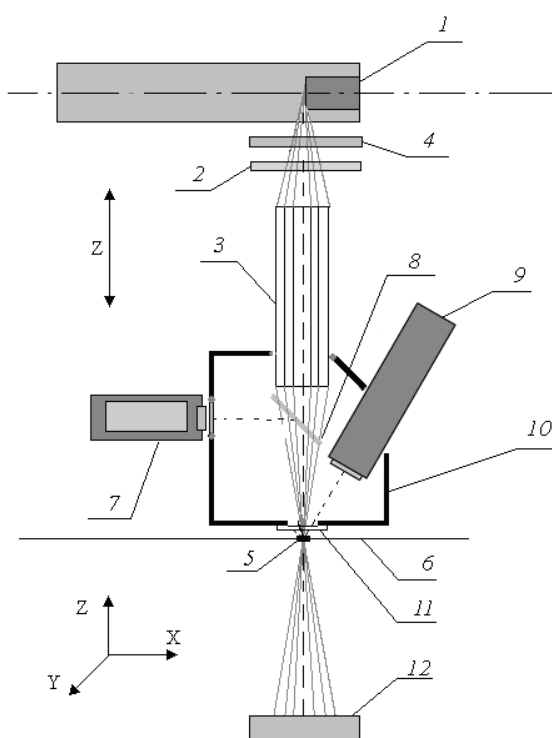


Рисунок 3 – Схема рентгенофлуоресцентного микроанализатора

зеркала (8), прозрачного для рентгеновского излучения и отражающего свет в видимом диапазоне. Зеркало (8) совмещает оптическую ось системы видеонаблюдения с осью рентгеновского микрозонда. Камера видеонаблюдения с объективом (7), обеспечивающим увеличение изображения до 100 крат, позволяет вывести на монитор компьютера изображение исследуемого участка объекта исследования.

Регистрация рентгенофлуоресцентных спектров осуществляется полупроводниковым энергодисперсионным детектором (9). Выходное окно поликапиллярной линзы (3), входное окно энергодисперсионного детектора (9) и объектив цифровой видеокамеры (7) введены в вакуумируемую камеру (10) с выходным окном из полимерной пленки (11). Воздух из камеры откачивается форвакуумным насосом (на рисунке 3 не показан) для минимизации потерь флуоресценции при анализе образцов, содержащих легкие элементы. Канал регистрации рентгенографических изображений выполнен на основе точечного светодиода (12). Получение изображений осуществляется с помощью сканирования.

В главе приведены результаты оценки метрологических параметров рентгеноспектрального определения ряда элементов в ювелирных сплавах на основе золота методом фундаментальных параметров на рентгеновском аналитическом микрозонде-микроскопе «РАМ-30μ». Экспериментально оценены статистические пределы обнаружения для ряда элементов. Результаты определения сопоставлены с данными для аттестованной рентгенофлуоресцентной аппаратуры ЗАО «Научные приборы» (см. таблицу 2).

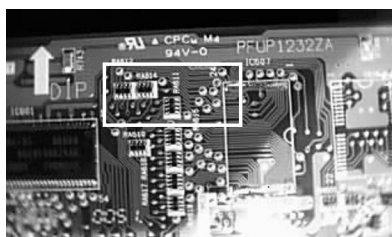
На основе анализа погрешностей рентгеноспектрального флуоресцентного определения ряда элементов показана возможность применения рентгеновского аналитического микрозонда-микроскопа «РАМ-30μ» для приближенно-количественного анализа ювелирных сплавов.

Таблица 2 – Пределы обнаружения некоторых элементов на рентгенофлуоресцентном оборудовании ЗАО «Научные приборы»

Модель спектрометра	Предел обнаружения, %						
	Au	Ag	Cu	Ni	Zn	Cd	Pd
Настольный рентгенофлуоресцентный спектрометр РЕАН	0,018	0,048	0,007	0,006	0,028	0,034	0,040
Портативный рентгенофлуоресцентный спектрометр X-SPEC	0,100	0,300	0,040	0,030	0,050	0,180	0,060
Рентгеновский аналитический микронд-микроскоп РАМ-30μ	0,012	0,041	0,013	0,010	0,049	0,105	0,070

Представлены результаты элементного картирования образцов различной формы и структуры поверхности. На рисунке 4 (б) приведены результаты элементного картирования печатной платы. Исследование образца проводилось на предмет возможности визуализации распределения элементов, регулируемых директивами RoHS/ELV. Условия измерений: напряжение рентгеновской трубки – 35 кВ, ток 10 мА, атмосфера – воздух, скорость сканирования – 500 мкм/сек, без фильтрации первичного излучения.

а)



б)



Рисунок 4 – Выбор области сканирования печатной платы (а); результаты элементного картирования платы, распределение брома (б)

В **Заключении** сформулированы основные результаты диссертации.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Основные результаты и выводы диссертационной работы заключаются в следующем.

1. Представлены и проанализированы основные современные подходы аппаратной реализации метода микро-РФА.

2. С опорой на физико-математические модели процессов рентгеновской флуоресценции теоретически обоснована возможность оптимизации схемы рентгенофлуоресцентного микроанализатора для улучшения аналитических характеристик метода. Предложен подход, позволяющий путем расчетов и моделирования всех элементов и систем рентгенофлуоресцентного микроанализатора создавать оптимальные рентгенооптические схемы приборов с заданными параметрами.

3. Теоретически обоснована оптимальная схема формирования рентгеновского микрозонда на основе микрофокусного рентгеновского источника и поликапиллярной рентгеновской линзы. С этой целью на основе результатов моделирования произведен выбор материала анода рентгеновской трубки, проведен расчет расходимости и интенсивности потока первичного рентгеновского излучения на выходе трубки, смоделирована энергетическая зависимость системы «рентгеновская трубка – поликапиллярная линза». На основе расчетных данных определены параметры сопряжения рентгеновской трубки с поликапиллярной рентгеновской линзой. Оптимизация взаимного положения системы «рентгеновская трубка – поликапиллярная линза» позволяет увеличить значение интенсивности потока излучения на выходе линзы.

4. Теоретически рассчитана и экспериментально опробована система фильтрации первичного рентгеновского излучения для рентгенофлуоресцентного микроанализатора. Использование предлагаемой системы первичной фильтрации обеспечивает минимальный уровень фона когерентно и некогерентно рассеянного излучения и, как следствие, улучшение пределов обнаружения при регистрации рентгеновской флуоресценции.

5. На основе результатов моделирования относительных интенсивностей характеристического излучения для ряда элементов определена оптимальная геометрия рентгенооптической схемы, обеспечивающая интенсивность регистрируемого сигнала на достаточно высоком уровне.

6. Предложена и опробована комбинация «диафрагма – поликапиллярная линза» для формирования рентгеновского микрозонда с заданными размерами и расходимостью. Такая система позволяет сформировать микрозонд переменного размера с малой расходимостью пучка рентгеновских лучей, что, в свою очередь, повышает разрешающую способность микроанализатора.

7. Реализован способ совмещения осей системы регистрации оптических изображений и рентгеновского микрозонда путем применения встроенного в измерительную камеру цифрового микроскопа в комбинации с зеркалом, отражающим излучение в видимом диапазоне и прозрачным для рентгеновского излучения. Такой подход позволяет избавиться от искажения изображения при выборе области анализа.

8. Полученные в работе результаты использовались в ЗАО «Научные приборы» при создании рентгеновского аналитического микрозонда-микроскопа «РАМ-30μ», предназначенного для исследований объектов методами оптической микроскопии, локального элементного микроанализа, проведения элементного картирования и рентгенографических исследований.

9. Описана и экспериментально опробована методика по проведению приближенно-количественного химического анализа ювелирных сплавов на основе золота. Анализ погрешностей рентгеноспектрального флуоресцентного определения ряда элементов в ювелирных сплавах позволил сделать вывод о возможности использования микрозонда-микроскопа для проведения приближенно-количественного анализа.

10. Проведена оценка аналитических возможностей микрозонда-микроскопа. Представлены результаты анализа образцов различной природы, формы и структуры поверхности методами оптической микроскопии, рентгенографии и рентгенофлуоресцентного микроанализа. Приведенные

данные позволяют судить о перспективной возможности применения рентгеновского аналитического микрозонда-микроскопа «РАМ-30μ» в различных областях науки и производства.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Бахвалов А.С., **Чижова Е.В.** Экспертная система для анализа рентгенофлуоресцентных спектров // Материалы третьего Всероссийского форума студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и инновации в технических университетах». Санкт-Петербург. 28-30 октября 2009 г. С. 129-130.

2. Бахвалов А.С., **Чижова Е.В.** Элементное картирование поверхности методом рентгенофлуоресцентного микроанализа // Тезисы докладов конференции (Школы-семинара) по физике и астрономии для молодых ученых Санкт-Петербурга и Северо-Запада «Физика. СПб». Санкт-Петербург. 29-30 октября 2009 г. С. 13-14.

3. Bakhvalov A., **Chizhova E.**, Nikolaev V. Applications of a new μ XRF spectrometer RAM-30 μ // Programm Tagungsbeiträge Fachtagung Prozessnahe Röntgenanalytik PRORA. Berlin. 26 und 27 november 2009. P. 28.

4. Бахвалов А.С., Николаев В.И., **Чижова Е.В.** Приборы для рентгенофлуоресцентного микроанализа и элементного картирования // Сборник научных трудов Второй международной научно-практической конференции «Измерения в современном мире – 2009». Санкт-Петербург. 8-10 декабря 2009 г. С. 95-96.

5. Бахвалов А.С., Волков П.Г., **Чижова Е.В.** Получение непрерывного распределения элементов методом рентгенофлуоресцентного микроанализа // В мире научных открытий. 2010. № 2 (08). Ч. 3. С. 19-20.

6. Николаев В.И., Бахвалов А.С., **Чижова Е.В.** Рентгеновский микрозонд-микроскоп РАМ-30μ для исследования полупроводниковых систем // Тезисы докладов XX Всероссийской конференции «Рентгеновские и электронные спектры и химическая связь». Новосибирск. 24-27 мая 2010 г. С. 95.

7. Николаев В.И., **Чижова Е.В.** Развитие и перспективы трехмерного рентгенофлуоресцентного микроанализа (аналитический обзор) // Научное приборостроение. 2011. т. 21, № 2. С. 3-10.

8. Бахвалов А.С., Елохин В.А., Николаев В.И., **Чижова Е.В.** Микронзондовые исследования на рентгеновском аналитическом микроскопе РАМ-30μ // VII Всероссийская конференция по рентгеноспектральному анализу. Тезисы конференции. Новосибирск. 19-23 сентября 2011. С. 30.

9. **Чижова Е.В.**, Николаев В.И. Оптимизация рентгенооптической схемы рентгенофлуоресцентного микроанализатора // XL Неделя науки СПб ГПУ: Материалы международной научно-практической конференции. Ч. XXI. Санкт-Петербург. 5-10 декабря 2011 г. С. 18-20.

10. Бахвалов А.С., **Чижова Е.В.**, Николаев В.И. Система фильтрации первичного излучения в рентгенофлуоресцентном микроанализаторе // XL Неделя науки СПб ГПУ: Материалы международной научно-практической конференции. Ч. XXI. Санкт-Петербург. 5-10 декабря 2011 г. С. 20-22.

11. **Чижова Е.В.** Расчет геометрии рентгенооптической схемы рентгенофлуоресцентного микроанализатора // Научно-технические ведомости СПб ГПУ. 2012. № 1. С. 37-41.

12. **Чижова Е.В.**, Ершов Н.Н. Расчет системы фокусировки первичного излучения в рентгенофлуоресцентном микроанализаторе // Научно-технические ведомости СПб ГПУ. 2012. № 1. С. 41-44.

13. **Чижова Е.В.** Моделирование работы рентгенофлуоресцентного микроанализатора, оценка аналитических и метрологических параметров // Научное приборостроение. 2012. т. 22, № 2. С. 55-65.

14. Бахвалов А.С., Волков П.Г., Елохин В.А., Коробейников С.И., Николаев В.И., **Чижова Е.В.** Рентгеновский микронзонд-микроскоп РАМ-30μ ЗАО «Научные приборы» // IV Всероссийская конференция «Аналитические приборы». Тезисы докладов. Санкт-Петербург. 26-30 июня 2012 г. С. 67.

15. Бахвалов А.С., Волков П.Г., Елохин В.А., Ермолинская В.А., Коробейников С.И., Коробейникова Л.П., Николаев В.И., **Чижова Е.В.**

Приборы рентгенофлуоресцентного анализа ЗАО «Научные приборы» // IV Всероссийская конференция «Аналитические приборы». Тезисы докладов. Санкт-Петербург. 26-30 июня 2012 г. С. 68.

16. Кучкин А.В., Павлов А.О., Соколов В.Н., Протопопов С.В., Елохин В.А., Николаев В.И., Коробейников С.И., Бахвалов А.С., **Чижова Е.В.** Рентгенофлуоресцентный микроскоп // Патент РФ № 120252.