

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

АО «ИЦ «Буревестник»

/В. И. Цветков/

«01» 10 2018 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Портного Александра Юрьевича «Физические процессы формирования сигнала и фона при использовании энергодисперсионных детекторов рентгеновского и гамма излучения», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.01 – «Приборы и методы экспериментальной физики»

Актуальность темы диссертации

Проблема повышения соотношения сигнал/фон является актуальной для всех областей измерений. Естественно, она относится и к рентгеноспектральному анализу. В настоящее время в рентгенофлуоресцентном анализе используют два основных вида спектрометров: энергодисперсионный и с дифракцией с помощью кристалл-анализаторов, причем в последних часто используются газовые детекторы в пропорциональном режиме, которые тоже можно отнести к энергодисперсионным.

Для оценки возможности улучшения сигнал/фон требуются адекватные модели, с помощью которых можно проанализировать составляющие фонового сигнала. Изложенная задача предполагает совместное описание как источников излучения, взаимодействия излучения с материалом образца, так и последующего взаимодействия излучения с деталями спектрометрического

тракта, детектором, равно как и последующей системы детектирования зарегистрированного сигнала.

Таким образом, выбранная диссертантом тема исследований актуальна и представляет интерес для разработчиков рентгеноспектральной аппаратуры.

Структура диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы из 464 наименований, включает 77 рисунков, 7 таблиц. Общий объем диссертации составляет 292 страницы.

Оценка приведенного исследования и приведенных результатов

Во введении сформулирована цель и задачи исследования, обоснована актуальность темы исследований.

В первой главе рассмотрены основные физические процессы, приводящие к возникновению рентгеновского излучения, взаимодействию излучения и электронов с веществом, кристалл-анализатором, детектором, основы обработки полученного сигнала электроникой. Указанные процессы обобщены с точки зрения дальнейшего использования в моделях возникновения сигнала и фона.

Во второй главе на основании моделирования методом Монте-Карло рассмотрен процесс формирования функции отклика детектора с учетом как потерь в рамках переноса фотонов, так и возникающих при электронном переносе. Результаты расчетов сопоставлены с экспериментальными данными в области энергий фотонов до 10кэВ, где основной вклад в фоновую составляющую сигнала дает выход флуоресцентного фотона после фотопоглощения с формированием пика фотопотерь и выхода электронов с образованием хвоста электронных потерь, более 30 кэВ, где свой вклад в формирование низкоэнергетического фона начинает давать регистрация в детекторе высокоэнергетического излучения, сопровождающееся выходом за пределы чувствительной зоны детектора комптоновски рассеянного фотона,

и регистрацией электрона отдачи как фотона с оставшейся энергией. Рассмотренный способ моделирования может использоваться и при оценке пространственных областей поглощения излучения в случае координатно-чувствительных детекторов высокоэнергетического излучения.

В третьей главе представлена модель измеряемого сигнала и фона в энергодисперсионном спектрометре на основе введения геометрического фактора разброса углов рассеяния в образце и математической модели детектора, представленной в главе 2, а также сравнение измеряемых спектров, полученных при использовании данной расчетной модели, расчетных спектров образца, полученных по методу Монте-Карло и данных, полученных экспериментально. Проведена оценка изменения контрастности для энергодисперсионного спектрометра с полупроводниковым детектором при изменении условий регистрации: напряжения на рентгеновской трубке, толщины кремниевого детектора. Показана возможность оптимизации отношения сигнал/фон в области энергий регистрации фотонов высокой энергии после потери фотона в результате комптоновского рассеяния в детекторе и регистрации электрона отдачи как фотона, за счет уменьшения толщины детектора и соответствующего уменьшения эффективности детектора в области высоких энергий, а также при выборе источников излучения и материала детектора.

В четвертой главе проведено исследование параметров двухслойных детекторов, первый регистрирующий слой которых выполнен из Si, второй – из Ge, GaAs, CdTe, с дальнейшим подключением к схеме антисовпадений. Указанные слои детектора, полученные в разных технологических процессах, могут быть расположены с необходимым технологическим зазором между ними. Показано, что в подобном детекторе можно эффективно избавиться от пиков фотопотерь второго детектора, что может расширить варианты применяемых детекторов во втором слое в случае необходимости обеспечения широкой полосы регистрируемых энергий. Приведены расчеты, показывающие уменьшение фона в области пиков фотопотерь Ge детектора и

области регистрации фотонов после выхода комптоновски рассеянного фотона в теле детектора.

В пятой главе на основе экспериментальных данных рассмотрены особенности прохождения регистрируемого впоследствии излучения в рентгеноспектральных схемах по Соллеру и Иогансону. Показано, что целевая схема по Иогансону обеспечивает гораздо меньший вклад в сигнал «диффузно рассеянного каналом» излучения образца. На базе использованной априорной информации о формировании регистрируемого сигнала в виде набора линий с энергиями, соответствующими закону Вульфа – Бреггов, показана возможность фильтрации амплитудного спектра, приводящей к уменьшению фона примерно в 3 раза при сохранении интенсивности основной линии для Na канала спектрометра СРМ-25.

Достоверность научных положений, выводов и технических решений

Степень обоснованности научных положений, выводов основывается на согласованности научных выводов и результатов экспериментов, приемлемой сходимостью результатов теоретических исследований и экспериментов, согласованностью результатов теоретических исследований с результатами, представленными в других источниках. Научные положения и выводы, изложенные в диссертационной работе Портного А.Ю. достаточно обоснованны.

Научная новизна положений, выводов и рекомендаций

Научная новизна диссертационной работы заключается в комплексном анализе процессов формирования сигнала и фона, начиная от излучателя, процессов в образце, спектрометрическом канала (для спектрометра с волновой дисперсией), детекторе.

Предложенная математическая модель детектора, учитывающая процессы переноса излучения и электронов в веществе детектора, позволяет

рассчитать параметры функции отклика детектора, таких, как: вероятность полного поглощения энергии фотона в теле детектора, вероятности регистрации с потерями энергии после фотопоглощения с последующей флуоресценцией, комптоновского рассеяния с последующими потерями, связанными с выходом рассеянных фотонов из чувствительной области детектора, а также связанных с выходом электронов высоких по сравнению с тепловыми энергий из области детектирования.

Показано, что в области высоких энергий процессы переноса фотонов могут существенно ограничивать разрешение позиционно-чувствительных детекторов.

Впервые рассмотрена математическая модель двухслойного детектора с первым слоем из Si, а вторым – из Ge, GaAs, либо CdTe, с дальнейшим включением детекторов по схеме совпадений с суммированием амплитуд либо антисовпадений с режекцией событий. Рассчитаны вероятности регистрации фотона в различных областях функции отклика детектора. Показано, что данная схема эффективно подавляет пики фотопотерь второго детектора. Впервые показано, что при применении такого детектора может быть уменьшен фон как от процессов регистрации в области комптоновских потерь первого детектора (по сравнению с толстым детектором из данного материала), так и пиков фотопотерь второго детектора с большим Z .

Впервые предложен способ фильтрации амплитудного распределения, учитывающий особенности функции отклика детектора, позволяющий для Na канала по Иогансону при сохранении уровня сигнала примерно в три раза уменьшить фон.

Практическая значимость работы

Предложенная модель физических процессов, включающая процессы, происходящие в детекторе, может служить основой оценки контрастности для различных способов рентгеноспектрального анализа, выбирать

предпочтительные с точки зрения соотношения сигнал/фон условия, в том числе за счет толщины и материала детектора.

Предложенные комбинированные детекторы могут быть использованы в случае необходимости измерений в широком диапазоне энергий.

Предложенный способ фильтрации амплитудного распределения при сегодняшнем состоянии цифровой электроники может быть реализован практически для каналов как по Иогансону, так и Соллеру.

Основные замечания

1. Автор диссертации (на стр.22 автореферата) делает спорный вывод о независимости параметра контрастность спектральной линии от толщины детектора при энергодисперсионном рентгенофлуоресцентном анализе. Этот вывод противоречит разделу 3.8.2 (см. стр. 189 Диссертации) «Влияние толщины Si детектора на контрастность» диссертации, в котором автор явно демонстрирует в таблице 3.3 наличие зависимости между толщиной детектора и контрастностью спектральной линии TiK.

Параметр контрастность спектральной линии (отношение интенсивности аналитической линии от контрольного образца к интенсивности от фонового образца) зависит от толщины детектора, определяющей эффективность регистрации квантов. Например, для области мягкого рентгеновского излучения (от 1 до 10кэВ), при разной толщине газового слоя в неоновом газовом пропорциональном счетчике интенсивность аналитической линии будет различной при сравнительно постоянном фоне, являющемся суперпозицией рассеянного на образце тормозного излучения РТ и «горба потерь», обусловленного эффектом неполного сбора заряда в теле счетчика.

Автору следует пояснить что же имелось в виду.

2. На стр. 221 диссертации приводятся данные для Na-канала аппарата СРМ-25М, построенного на Ag-пропорциональном счетчике, и связанные с этим сложности при дискриминации линии NaK от имеющихся

паразитных пиков. Однако, изложенных автором проблем можно было бы избежать при использовании Ne в качестве газа наполнителя счетчика; это исключило бы влияние пика вылета и значительно уменьшило бы влияние старших порядков отражения от кристалла-анализатора и в конечном итоге понизило бы значение статистического предела обнаружения Na.

3. В тексте диссертации имеется небрежность в терминологии и обозначениях; так, встречаются словосочетания: «анализируемая линия», «в детектор поступает спектр фотонов», «линия Ti». В то время, как правильнее было бы изложить соответственно: «аналитическая линия», «в детектор направлены фотоны различных энергий» и «линия TiK_α».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Перечисленные недостатки существенно не влияют на научное содержание работы и не меняют высокой оценки диссертации А.Ю.Портного.

Анализ содержания диссертации позволяет сделать заключение о высоком теоретическом уровне и практической значимости полученных в ней результатов, сделанных выводов и предложенных решений. Работа обладает четкой структурой, материал подается автором в логической последовательности, продиктованной поставленной целью и соответствующими задачами. Ее результаты являются оригинальными, своевременно опубликованы в научных журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, докладывались на международных, всероссийских конференциях.

Аннотация диссертации и список публикаций автора правильно и полно отражают содержание диссертации.

Потенциальные потребители результатов диссертационного исследования.

Полученные в диссертации результаты могут быть использованы при разработке и эксплуатации рентгенофлуоресцентных спектрометров. В части предложенного метода цифровой фильтрации амплитудного спектра эти разработки могут быть использованы производителями кристалл-дифракционных рентгенофлуоресцентных спектрометров: ИЦ «Буревестник», ПНО «Спектрон», НПАО «Научприбор» и в аналитических лабораториях научных институтов (например, «Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН», «ФГБУН Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН», «Институт неорганической химии СО РАН» «Институт минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов (ИМГРЭ РАН)», «Институт спектроскопии РАН», «Северо-Восточный комплексный центр НИИ ДВО РАН», «Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН», «Геологический институт СО РАН») и металлургических предприятий, предприятий горно-добывающей промышленности («Дальтек У-Ка ТОО»), ГСЭН, водоканалов, Госкомгидромета и других организаций для элементного анализа различных объектов естественного и искусственного происхождения.

В части комплексной математической модели детектора рентгеновского излучения и комбинированных детекторов - разработки могут быть использованы в «Уральском федеральном университете им. первого Президента России Б.Н. Ельцина» и в СПб ГЭТУ «ЛЭТИ» при разработке детекторов и обучении студентов, а также в высших учебных заведениях, где на физических и химических факультетах (например, кафедры аналитической химии «Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова», «С.-Петербургского государственного университета», «Томского государственного университета», «Новосибирского государственного университета») читается курс рентгенофлуоресцентного анализа.

Математические модели взаимодействия излучения с веществом могут быть также использованы в медицинских целях в «ФГБУ „Национальный медицинский исследовательский центр онкологии им. Н.Н. Блохина“ Минздрава России», «отделении радионуклидной диагностики НИИ онкологии Томского НИМЦ», «МРНЦ им. А.Ф. Цыба», «ООО „ЛСРМ“» с целью определения дозы излучения с учетом искажений при ее измерении детекторами.


Работа Портного А.Ю. выполнена на высоком научном уровне и представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно рассматривать как крупное научное достижение, результаты которого могут быть применены в области приборостроения рентгеноспектральной аппаратуры.


Диссертация соответствует формуле специальности 01.04.01 Приборы и методы экспериментальной физики в части пунктов «4. Исследование фундаментальных ограничений на точность измерений» и «8. Разработка методов математической обработки экспериментальных результатов. Моделирование физических явлений и процессов» и отрасли науки «физико-математические науки» за разработку методов математической обработки экспериментальных результатов, моделирование физических явлений и процессов, исследование фундаментальных ограничений на точность измерений.


Таким образом, диссертация Портного Александра Юрьевича «Физические процессы формирования сигнала и фона при использовании энергодисперсионных детекторов рентгеновского и гамма излучения» соответствует всем критериям, предъявляемым к докторским диссертациям Положением о присуждении ученых степеней, утвержденных Постановлением правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842, а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-


математических наук по специальности 01.04.01 – «Приборы и методы экспериментальной физики».


Материалы диссертации рассмотрены, и отзыв утвержден на заседании научно-технического совета ИЦ «Буревестник» (протокол № 2018/05 от 27 сентября 2018 года).


Заведующий комплексным отделом аналитической техники,
кандидат технических наук
А.Д. Гоганов 

Заведующий лабораторией кристаллов-анализаторов,
кандидат физико-математических наук
М.Т. Коган 

И.о. ученого секретаря научно-технического совета ИЦ «Буревестник»
А.В. Нелюбов 

Подпись А.Д. Гоганова
Заверяю  Нач. отдела кадров ИЦ «Буревестник»

Подпись М.Т. Когана
Заверяю  Нач. отдела кадров ИЦ «Буревестник»

Подпись А.В. Нелюбова
Заверяю  Нач. отдела кадров ИЦ «Буревестник»

