

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель директора по научной работе

ФНПЦ «Кристаллография и
фотоника» РАН, д.ф.-м.н.

 А.Э. Волошин

«10» октября 2019 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Кожевникова Данилы Александровича «Развитие метода мультиэнергетической рентгеновской томографии с применением детекторов на основе микросхем семейства Medipix», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики.

Диссертация Д.А. Кожевникова посвящена развитию метода рентгеновской компьютерной томографии (РКТ). В работе применяются гибридные пиксельные детекторы на основе микросхем Medipix, работающие в режиме счета фотонов и позволяющие получить дополнительную информацию о спектре зарегистрированного излучения. Учет этой информации позволяет реконструировать не только пространственное распределение рентгеновской плотности, но и идентифицировать отдельные вещества.

Метод РКТ широко используется в медицине, геологии, системах безопасности и промышленности для неразрушающего контроля. С развитием детекторов рентгеновского излучения непрерывно совершенствуется метод РКТ. В настоящее время для получения информации о вещественном составе изучаемого объекта применяется двухэнергетическая томография. Однако, такой подход не позволяет однозначно определить вещества, в отличие от мультиэнергетической томографии, которая позволяет идентифицировать конкретное вещество на основе информации о К-крае в характеристическом спектре поглощения. Перспективный способ проведения мультиэнергетического томографического сканирования основан на применении гибридных пиксельных детекторов на основе микросхем Medipix, позволяющих получить теневые рентгеновские проекции для определенного диапазона энергий излучения. Таким образом **актуальность** исследований обусловлена

развитием детекторов рентгеновского излучения и необходимостью развития методов рентгеновской томографии, позволяющих учесть энергетическую информацию. В работе рассматриваются пиксельные детекторы с чувствительным объемом не только из кремния, но и других перспективных полупроводников, таких как арсенид галлия и теллурид кадмия.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения. Полный объем диссертации составляет 133 страницы, включая 66 рисунков и 2 таблицы. Список литературы содержит 89 наименований.

Первая обзорная глава посвящена описанию принципа рентгеновской компьютерной томографии. В первой части рассматриваются основы рентгеновской томографии: источники рентгеновского излучения, взаимодействие рентгеновского излучения с веществом, детекторы рентгеновского излучения, методы вычислительной реконструкции, принципы мультиэнергетической рентгеновской томографии и методы идентификации веществ. Во второй части рассматриваются различные версии микросхем семейства Medipix и приводится сравнение наиболее важных для рентгеновской томографии характеристик.

Во второй главе приводится описание моделирование отклика гибридного полупроводникового детектора методом Монте-Карло: описана математическая модель детектора и её проверка с помощью сравнения с экспериментальными данными.

В третьей главе дается описание предложенного метода энергетической калибровки детектора на основе микросхемы семейства Medipix по краю спектра рентгеновской трубки, рассмотрены недостатки существующих методов, приводится подробное описание процедуры энергетической калибровки, её экспериментальной проверки.

В четвертой главе рассматривается рентгеновский микротомограф MARS. В первой части дается описание микротомографа. Во второй части приводится предложенная процедура механической юстировки и оценка пространственного разрешения. В третьей части описано разработанное программное обеспечение для проведения спектральных сканирований. В четвертой части приведены примеры не спектральных исследований на микротомографе MARS.

В пятой главе рассматривается мультиэнергетическое рентгенотомографическое исследование с помощью микротомографа MARS на примере специального образца с набором контрастных веществ. Описана процедура сканирования и определения пространственного распределения веществ, предлагается способ повышения качества определения

пространственного распределения веществ с помощью предварительной сегментации данных реконструкции.

В шестой главе предлагается комбинировать три детектора с чувствительными объемами из различных полупроводников (кремний, арсенид галлия, теллурид кадмия) в трехслойный детектор. Проведено сравнение материалов чувствительного объема в применении к рентгеновской томографии, определена комбинация оптимальных толщин чувствительных объемов для конкретного диапазона энергий излучения и проведена экспериментальная проверка, демонстрирующая преимущества подхода.

Основные результаты по теме диссертации опубликованы в 25 печатных изданиях, 5 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК и входящих в международные базы данных Web of Science и Scopus, 12 – в тезисах докладов. Основные результаты докладывались на 15 международных и всероссийских конференциях.

Диссертант проделал большой объем работы на современном уровне, характеризующий его как физика-экспериментатора высокой квалификации. Достоверность результатов, представленных в диссертации, не вызывает сомнений.

Научная новизна и практическая ценность настоящей диссертации состоят в том, что:

- Создан инструментарий для Монте-Карло моделирования детектора на основе микросхем семейства Medipix и проведено сравнение её предсказаний с экспериментальными измерениями.
- Предложен оригинальный метод выравнивания энергетических порогов пикселей детектора на основе микросхемы семейства Medipix по краю спектра рентгеновской трубки на произвольной энергии с одновременной энергетической калибровкой детектора.
- Впервые детекторы на основе микросхемы Timerix и чувствительным объемом из арсенида галлия толщиной 300 мкм и 500 мкм применены для мультиэнергетического рентгенотомографического исследования.
- Разработана новая процедура комплексной механической юстировки микротомографа MARS. 5. Проведены томографические сканирования серии геологических и медицинских образцов с применением детектора Medipix.
- Продемонстрирован способ повышения качества идентификации веществ с помощью сегментации реконструированного изображения образца на основе зависимости линейного коэффициента ослабления от энергии.

- Впервые предложена и реализована идея трехслойного детектора на основе микросхем Timepix с чувствительными объемами из кремния, арсенида галлия и теллурида кадмия.

Значимость полученных автором диссертации результатов определяется актуальностью задачи диссертации и возможностями развивающегося метода рентгенотомографического анализа, открывающимися благодаря использованию информации о спектре излучения. Результаты работы позволяют повысить информативность неразрушающего контроля в досмотровых системах, медицине, геологии и др.

Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Диссертация хорошо структурирована и оставляет впечатление комплексного, всестороннего исследования, проведенного на высоком уровне.

По тексту диссертации имеется несколько замечаний.

1. В тексте имеется ряд неточностей или спорных утверждений. Например, на стр. 12 указывается, что синхротрон является источником мягкого рентгеновского излучения. Это, однако, не совсем так. Различные синхротроны имеют и различные максимумы по длине волны излучения. Однако, даже те синхротроны (например, ESRF), для которых максимум излучения находится в районе 8 кэВ имеют протяженный спектр, что допускает возможность проведения исследований при более высоких энергиях, вплоть до 70 кэВ.
2. На стр. 15 автор указывает, что детекторы с косвенной регистрацией рентгеновского излучения имеют низкое пространственное разрешение. Это утверждение спорно, поскольку размер пикселя CCD или CMOS матриц может составлять в настоящее время примерно 6 мкм, а применение оптических систем после сцинтиллятора позволяет повысить разрешение до величин порядка 1 мкм. При этом автор указывает (например, стр.24), что разрешение микросхем семейства Medipix – 55 мкм. Т.е. высокое разрешение не является достоинством этих детекторов.
3. К недостаткам можно отнести некоторые другие неточности и опечатки, не влияющие, однако, на смысл и качество текста диссертации. Кроме того, подписи к рисункам могли бы быть более подробными. Следует добавить, что подписи к рисункам плохо отделены от основного текста.

Заключение

Диссертация Д.А. Кожевникова “Развитие метода мультиэнергетической рентгеновской томографии с применением детекторов на основе микросхем семейства Medipix” соответствует всем критериям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, установленным в разделе II Положения о порядке присуждения ученых степеней, утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, а сам Данила Александрович Кожевников, безусловно, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики.

Диссертация была рассмотрена на заседании Объединённого научного семинара Института кристаллографии им. А.В. Шубникова ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН (Протокол № 87 от 10.10.2019 г.).

Отзыв подготовил
заведующий лабораторией рефлектометрии и малоуглового рассеяния
Института кристаллографии им. А.В. Шубникова ФНИЦ «Кристаллография и
фотоника» РАН, доктор физико-математических наук, профессор



B. E. Асадчиков

e-mail: asad@crys.ras.ru
Тел. +7(499)135-22-00

Федеральное государственное учреждение «Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук» (ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН).
Адрес: 119333, г. Москва, Ленинский пр., 59. Тел.: +7(499)135-63-11
Оф. сайт: <http://www.kif.ras.ru>, E-mail: office@crys.ras.ru