

**ОТЗЫВ** официального оппонента  
на диссертацию Трунова Дмитрия Николаевича

«Сцинтилляционные детекторы нейтронов на основе кремниевых фотоумножителей и органического световода», представленной к защите на заседании диссертационного совета 24.1.163.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований Российской академии наук на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2 — Приборы и методы экспериментальной физики.

**Актуальность темы**

В настоящее время исследования с применением нейтронов широко используются в различных областях науки и техники: ядерной физике, физике конденсированного состояния, геологии, археологии, биологии, медицине, материаловедении. Благодаря таким свойствам нейтрона как отсутствие электрического заряда и наличие магнитного момента нейтронные методы позволяют получить уникальную информацию, которую невозможно или очень трудно получить другими методами. Одним из ключевых элементов любой нейтронной установки или прибора является детектор нейтронов. Характеристики нейтронных установок, в частности характеристики нейтронных дифрактометров, во многом определяются характеристиками используемых нейтронных детекторов или детекторных систем.

Поэтому тематика диссертационной работы Трунова Дмитрия Николаевича, которая посвящена разработке новых сцинтилляционных детекторов на основе  $\text{ZnS(Ag):}^6\text{LiF}$ , кремниевых фотоумножителей и органического прозрачного световода и их применению в нейтронной дифрактометрии является актуальной.

**Научная новизна работы.**

Из научных и методических результатов диссертационной работы, которые отражают новизну исследований и методических разработок можно отметить следующие:

1. Впервые разработаны и протестированы сцинтилляционные многослойные детекторы нейтронов на основе прозрачного пластикового световода для дифракционных измерений, обладающие компактными размерами и высокой эффективностью регистрации нейтронов (70% для 1.8 А). Предложен и запатентован вариант детектора, позволяющий дифференцировать нейтронное и гамма излучение.
2. Впервые предложен и запатентован метод сбора фотонов в детекторах с прозрачным световодом с помощью сверхширокоугольной линзы.
3. Разработан и запатентован оригинальный метод компенсации времени восстановления кремниевого фотоумножителя, позволяющий увеличить его загрузочную способность 2.7 раза.
4. Впервые предложена конструкция позиционно-чувствительных детекторов, в которых определение координат происходит на основе анализа затухания фотонов в объёме световода. Разработан метод определения координат на основе анализа амплитудного соотношения сигнала. Впервые проведены измерения и получены параметры координатного разрешения, достигаемого в подобном типе детектора.
5. Создан и запатентован уникальный высоко-светосильный дифрактометр «СФЕРА» с кольцевой детекторной системой в аксиальной геометрии. Разработаны оригинальные программные пакеты для управления и накопления данных установки, на которые получены Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

#### **Достоверность научных результатов, положений и выводов.**

Достоверность представленных в работе научных результатов, положений и выводов обусловлена применением широко используемых, общепринятых, современных экспериментальных методов исследования, получением

статистически достоверных экспериментальных данных, использованием методов численного моделирования, а также наличием публикаций в рецензируемых научных изданиях и докладов на различных национальных и международных конференциях.

### **Практическая значимость диссертации**

Практическая значимость диссертации убедительно подтверждается тем, что разработанные в работе детекторы уже используются вместо детекторов на основе изотопа гелий-3 в дифрактометрах на источнике ИН-06 ИЯИ РАН, что привело к значительному улучшению характеристик приборов. Очевидно, что разработанные детекторы могут быть использованы и в других нейтронных центрах.

Разработанные в диссертации методы сбора фотонов с использованием широкоугольной линзы, увеличения грузочной способности кремниевых фотоумножителей, определения координат в позиционно-чувствительных детекторах могут быть использованы для улучшения характеристик нейтронных приборов и установок.

Разработанный высоко-светосильный дифрактометр «Сфера» может быть использован на низкоинтенсивных компактных источниках нейтронов.

### **Основное содержание диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы. Общий объем текста диссертации составляет 135 страницы, включая 83 рисунков и 3 таблицы. Список литературы содержит 89 наименования. Описываемые в диссертации результаты многократно представлены автором на различных международных конференциях и опубликованы в рецензируемых журналах.

**Первая глава** посвящена рассмотрению существующих детекторов тепловых нейтронов. Описываются основные параметры детекторов и их

влияние на параметры дифракционных установок. Уделено внимание особенностям различных типов детекторов и особенностям применения двухмерных детекторов тепловых нейтронов.

**Вторая глава** посвящена описанию моделирования и разработки различных видов детекторов. Приведено сравнительное тестирование разработанных детекторов с детекторами на основе спектросмещающих волокон. Дается описание разработанных методов, таких как метод увеличения загрузочной способности кремниевых фотоумножителей, и метод сбора фотонов с использованием сверхширокоугольной линзы. Также приведено описание разработанной электроники. Конец главы посвящён моделированию и разработке позиционно-чувствительных детекторов (ПЧД), описанию предложенного метода определения координаты детектирования.

**Третья глава** посвящена описанию установок, на которых проводилось исследование разработанных детекторов. Приведены результаты тестирования детекторов как от радиоизотопного источника, так и на источниках ИН-06 и РАДЭКС ИЯИ РАН. Показаны возможность использования данных детекторов для замены существующих детекторов на основе трубок с газом гелий-3.

**В четвертой главе** дано детальное описание разработанной уникальной дифракционной установки СФЕРА. Приведены результаты первых испытаний данной установки.

**Заключение** содержит краткое изложение основных результатов диссертации.

#### **Замечания по работе.**

1. Соискатель использует неверные термины «монохроматические дифрактометры» и «монохроматические приборы» (стр. 15), «дифракционные детекторы» (подпись к рисунку 2 на стр. 19), «томографические детекторы» (стр. 24).

2. Не понятно предложение «Это позволяет производить (?) рассеяние нейтронов при различных длинах волн и ориентациях образца относительно пучка» (стр. 16).
3. Подпись к рисунку 1 на стр. 18: «График зависимости сечения нейтронов в зависимости (?) от энергии нейтрона» не ясна.
4. Соискатель часто использует названия изотопов (гелий 3, бор 10) не склоняя их. Например, выражение “детекторы на основе гелий 3» (стр. 19) правильно будет написать «детекторы на основе гелия 3».
5. Подпись к рисунку 3 на стр. 26 «Принципиальная схема регистрации нейтронов с (?) газонаполненного детектора» сформулирована плохо.
6. На рисунках 30 и 31 (стр. 53, 55) пронумерованы отдельные детали, название которых дается в тексте на других страницах (54, 56), что затрудняет чтение. Следовало бы указать название деталей в подписи к рисункам.
7. «Основные недостатки – требуется высокий (?) объем газа гелий 3» (стр. 34). Предложение сформулировано ошибочно.
8. «..... если небольшой фотодетектор считывает (?) большой лист сцинтилляционного материала» (стр. 40). Предложение не понятно.
9. «Гистограмма сигналов получаемых сигналов» (стр. 70). Опечатка.
- 10.«Основной вклад в транспортировку фотонов, даже при небольших размерах световода начинает иметь (?) эффект полного внутреннего отражения» (стр. 71). Предложение сформулировано плохо.
- 11.«Одномерный позиционный (?) детектор» (стр. 81), «Двухмерный позиционный (?) детектор» (стр. 82). Лучше написать «позиционно-чувствительный детектор».
- 12.«.... Но таким способом не получится добиться высокого разрешения (более 10 мм)» (стр. 85). Пространственное разрешение становится более высоким при уменьшении размеров различаемых объектов, а не увеличении.

13. «В частности, сцинтиллятор расположен в объеме сцинтиллятора» (стр.88).
14. За счет большего затухания детектор имеет большее разрешение (примерно 5 мм) (стр. 107). Непонятно, детектор имеет более высокое или низкое разрешение.
15. «.....из которого вырезался цилиндр размером 5x40x60 мм» (стр. 111). Размеры цилиндра определяются размерами диаметра (радиуса) и высоты.
16. На рисунке 61 (стр. 97) для сравнения гелиевых и сцинтилляционных детекторов приведены времяпролетные спектры образца жаропрочного сплава MoTiC. Из рисунка трудно сравнить эти детекторы, поскольку при съемке спектров использовались разное количество детекторов, разные расстояния образец- детектор и разные углы рассеяния.

Вышеуказанные недостатки не оказывают заметного влияния на суть диссертационной работы и не умаляют ее высокого научного уровня.

### **Заключение**

Диссертационная работа Трунова Дмитрия Николаевича «Сцинтилляционные детекторы нейтронов на основе кремниевых фотоумножителей и органического световода» является завершённой научно-квалификационной работой на актуальную тему и содержит новые методические и научные результаты. Диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне, является самостоятельным научным исследованием, имеет большое практическое значение для нейтронных исследований и характеризует автора как состоявшегося научного исследователя. Представленные в работе результаты являются достоверными и научно обоснованными.

Все основные положения и выводы диссертации опубликованы в изданиях, входящих в базы данных Web of Science, Scopus и перечень ВАК, и хорошо представлены на многочисленных конференциях. Следует отметить также, что

автором получено 3 патента на изобретение и 2 свидетельства о государственной регистрации программ для электронных вычислительных машин

Автореферат соискателя в полной степени отражает положения, выводы и рекомендации, содержащиеся в диссертации.

Диссертационная работа Трунова Дмитрия Николаевича «Сцинтилляционные детекторы нейтронов на основе кремниевых фотоумножителей и органического световода» по актуальности, объёму и уровню выполненных исследований, научной и практической значимости результатов полностью соответствует требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утверждённого постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор Трунов Дмитрий Николаевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2 - Приборы и методы экспериментальной физики.

доктор физико-математических наук,  
главный научный сотрудник  
Курчатовского комплекса  
синхротронно-нейтронных исследований  
тел. (499) 196-99-08,  
e-mail [Em\\_VT@nrcki.ru](mailto:Em_VT@nrcki.ru),  
НИЦ «Курчатовский институт»,  
Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1

Вячеслав  
Терентьевич  
Эм

30.10.2024

Подпись В.Т. Эма заверяю:

Главный учёный секретарь  
НИЦ «Курчатовский институт»

К.Е. Борисов

## Сведения об оппоненте

Эм Вячеслав Терентьевич, профессор, доктор физико-математических наук по специальности 01.04.07 - физика твердого тела, рабочий e-mail [em VT@nrcki.ru](mailto:em VT@nrcki.ru), рабочий телефон +7(499)196-9908

Список основных публикаций по теме рецензируемой диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. Эм В.Т. Multi-scale analyses of constituent phases in a trip-assisted duplex stainless steel by electron backscatter diffraction, in situ neutron diffraction, and energy selective neutron imaging // Scripta Materialia, 2019, 158, 105-109
2. Эм В.Т., Измерение остаточных напряжений в международном стандартном образце VAMAS на дифрактометре СТРЕСС реактора ИР-8 // Дефектоскопия, 2019, №4, стр. 61-66.
3. Эм В.Т., Stress distribution in laser metal deposited multi-layer thick-walled parts of Ti-6Al-V // Procedia Manufacturing, 2019, 36, 240-248
4. Эм В.Т., Исследование внутренних напряжений в несущей ленте-подложке из нержавеющей стали A1SI 310S для ВТСИ проводов второго поколения методом нейтронной стресс-дифрактометрии // Журнал технической физики, 2020, том 90, вып. 7, стр. 1095 - 1102
5. Эм В.Т., Two-Directional Stress-Free Comb Sample for Weld Study by Neutron Diffraction // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 2020, Vol. 14, Suppl. 1, pp. S82-S84
6. Эм В.Т., Нейтронные исследования внутренних напряжений в материалах и изделиях // Кристаллография, 2021, том 66, №2, с. 287-310.
7. Эм В.Т., Визуализация дифракционного контраста между ферритной и мартенситной фазами стали методом нейтронной радиографии И ПТЭ 2021, № 3, стр. 147-151
8. Эм В.Т., Нейтрон-дифракционное исследование влияния направления выращивания на распределение остаточных напряжений в призмах из аустенитной стали, полученных методом селективного лазерного сплавления // Физика металлов и металловедение, 2022, Т. 123, № 6, стр. 665-672
9. Эм В.Т., Нейтрон-дифракционное исследование влияния закреплений и термообработки на остаточные напряжения в стальном сварном шве И Физика металлов и металловедение, 2022, Т.123, №9, стр. 986-995.
10. Эм В.Т. Исследование остаточных напряжений в стальных пластинах, полученных методом прямого лазерного выращивания на жесткой подложке И Физика металлов и металловедение, 2023, том 124, №5, с. 443-450