

**III Всероссийская научно-
практическая конференция
«Задачи и методы нейтронных
исследований
конденсированных сред»
(ЗМНИКС-2023)**

Екатеринбург, 21-22 сентября 2023 года

Сборник тезисов

УДК 539.1.07:538.9
ББК 22.35в672я431

3-15 Задачи и методы нейтронных исследований конденсированных сред: Третья Всероссийская научно-практическая конференция (Екатеринбург, 21 – 22 сентября 2023 г.) : сборник тезисов докладов / под общ. ред. Е.А. Кравцова. – Екатеринбург: ИФМ УрО РАН, 2023, 23 с. (ЗМНИКС-2023) –Текст: электронный.

Представлены тезисы докладов участников Третьей Всероссийской научно-практической конференции «Задачи и методы нейтронных исследований конденсированных сред» по проблемам проведения экспериментов в области нейтронной физики, разработки измерительного оборудования, а также основных направлений фундаментальных и прикладных исследований.

Адресовано научным сотрудникам и преподавателям, специализирующимся в данной области, учащимся вузов, а также всем интересующимся данной тематикой.

УДК 539.1.07:538.9
ББК 22.35в672я431

Редакционная коллегия:

Кравцов Е.А. д.ф.м.н., заведующий лаборатории нейтронно-синхротронных исследований
Саламатов Ю.А. к.ф-м.н., с.н.с лаборатории нейтронно-синхротронных исследований
Матюхов В.В., лаборант лаборатории нейтронно-синхротронных исследований

Материалы сборника представлены в авторской редакции. Авторы несут полную ответственность за достоверность информации и возможность её опубликования в открытой печати.

©Авторы, содержание тезисов, 2023
©ИФМ УрО РАН, оформление, 2023

Оглавление

А. В. Белушкин, А. А. Богдзель, В. И. Боднарчук, О. Даулбаев, В. А. Дроздов, В. В. Журавлев, А. Г. Колесников, А. О. Колесников, А. К. Курилкин, С. А. Куликов, Е. И. Литвиненко, В. М. Милков, М. О. Петрова, М. М. Подлесный, В. И. Приходько, К.В. Хай, А. В. Чураков, В. В. Швецов.

ОПЫТ, РАЗРАБОТКИ И СОЗДАНИЯ ДЕТЕКТОРОВ ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ В НАУЧНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ОТДЕЛ КОМПЛЕКСА СПЕКТРОМЕТРОВ (НЭОКС) ИБР-2.....5

А. А. Богдзель, А. А. Козляковская, Е. И. Литвиненко, В. М. Милков

ЦИФРОВАЯ СИСТЕМА ОБРАБОТКИ ДЕТЕКТОРНЫХ СИГНАЛОВ С ОДНОМЕРНОГО ПОЗИЦИОННО-ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ДЕТЕКТОРА НА ОСНОВЕ ГЕЛИЕВОЙ РЕЗИСТИВНОЙ ТРУБКИ НА БАЗЕ OPEN FPGA ДИДЖИТАЙЗЕРА6

О. Даулбаев, Л.И. Исаенко, А.А. Богдзель, С.И. Лобанов, П.Г. Креницын, В.М. Милков, А.В. Белушкин

СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МОНОКРИСТАЛЛОВ LiInSe_2 ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ.....7

Д.И. Девятериков, Е.А. Кравцов, В.Д. Жакетов, Ю.В. Никитенко, Проглядо В.В., Степанова Е.А.

ОСОБЕННОСТИ МАГНИТНОГО УПОРЯДОЧЕНИЯ В ТОНКОЙ ПЛЁНКЕ NiO 8

*Е. А. Кравцов, Д. И. Девятериков, В. В. Проглядо, Е. М. Якунина**

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ И МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ СИСТЕМ Fe/MgO/Gd .9

И.А. Лихачёв, А.А. Рыжова, Ю.А. Саламатов, В.В. Проглядо

УПРАВЛЯЕМАЯ МОДИФИКАЦИЯ ГИДРИРОВАНИЕМ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ СВЕРХРЕШЁТОК Fe/Gd 10

М.В. Макарова, Е. А. Кравцов, Д.И. Холин, Ю.Н. Хайдуков

МАГНИТНАЯ СТРУКТУРА СВЕРХРЕШЕТОК Dy/Co11

Е. С. Никова, Ю. А. Саламатов, Е. А. Кравцов

МЕТОД РЕЗОНАНСНОЙ НЕЙТРОННОЙ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МАГНИТНЫХ ПЛЕНОК12

М.О. Петрова

ПОЗИЦИОННО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ДЕТЕКТОР ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ НА ОСНОВЕ ПЛОСКО-ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РЕЗИСТИВНОЙ КАМЕРЫ С $^{10}\text{B}_4\text{C}$ 13

М.М. Подлесный, А.А. Богдзель, В.М. Милков, В.И. Боднарчук

СРАВНЕНИЕ ДВУХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ С НЕЙТРОННЫХ СЧЁТЧИКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ ЭКРАНОВ $^6\text{LiF/ZnS(Ag)}$ И ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН С ПЕРЕИЗЛУЧАТЕЛЕМ СПЕКТРА.....14

А. И. Попов, Е. А. Кравцов, Н.О. Антропов

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЙТРОНОВОДНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ КИН DARIA15

<i>Р. А. Садыков, Д. Н. Трунов, В. Н. Марин, В.С. Литвин, С.Н. Аксенов, Д.А. Бучный</i> МНОГОДЕТЕКТОРНЫЙ ДИФРАКТОМЕТР СФЕРА	16
<i>Ю. А. Саламатов, Е. А. Кравцов</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РАСПРОСТРАНЕНИЯ НЕЙТРОНОВ В МНОГОСЛОЙНЫХ СТРУКТУРАХ МЕТОДОМ ФАЗОВО-АМПЛИТУДНЫХ ФУНКЦИЙ	17
<i>Ю.А. Саламатов, В.В. Матюхов, Е.А. Кравцов</i> СИНТЕЗ УГЛЕРОДНЫХ ПОКРЫТИЙ НА НАНОЧАСТИЦАХ МЕТАЛЛОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ	18
<i>А.А. Хассан</i> ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СВИНЕЦа-208 В КАЧЕСТВЕ ОТРАЖАТЕЛЯ РЕАКТОРА НЕПТУН	19
<i>А.М. Шихада</i> ОПТИМИЗАЦИЯ ИСТОЧНИКА НЕЙТРОНОВ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ПРИМЕНЕНИЙ, ВКЛЮЧАЯ ЛУЧЕВУЮ ТЕРАПИЮ	22

ОПЫТ, РАЗРАБОТКИ И СОЗДАНИЯ ДЕТЕКТОРОВ ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ В НАУЧНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ОТДЕЛ КОМПЛЕКСА СПЕКТРОМЕТРОВ (НЭОКС) ИБР-2.

А. В. Белушкин^{1,3,4}, А. А. Богдзель¹, В. И. Боднарчук¹, О. Даулбаев^{1,5}, В. А. Дроздов¹, В. В. Журавлев¹, А. Г. Колесников¹, А. О. Колесников², А. К. Курилкин¹, С. А. Куликов¹, Е. И. Литвиненко¹, В. М. Милков¹, М. О. Петрова¹, М. М. Подлесный¹, В. И. Приходько¹, К. В. Хай^{1,6}, А. В. Чураков¹, В. В. Швецов¹.

¹Лаборатория нейтронной физики им. И.М. Франка, Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

²Лаборатория ядерных проблем им. В. П. Джелепова, Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

³Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, Россия

⁴Институт физики, Казанский федеральный университет, Казань, Россия

⁵Институт ядерной физики, Алматы, Казахстан

⁶Dalat University, Dalat, Lamdong province, Vietnam

*e-mail: milkov@nf.jinr.ru

Объединенный Институт Ядерных Исследований (ОИЯИ) является одним из главнейших научных центров в России и мире благодаря существующим экспериментальным установкам, распределенных по всем лабораториям института.

Для Лаборатории Нейтронной Физики им. И.М. Франка (ЛНФ) реактор ИБР-2 является основной исследовательской установкой. Номинальная мощность реактора составляет 2 МВт, а длительность импульса (ПШПВ) составляет 320 мкс. Плотность потока тепловых нейтронов с поверхности теплового замедлителя составляет 10^{13} н/(см²·с).

Реактор ИБР-2 имеет 14 исследовательских каналов для вывода нейтронных пучков, предназначенных для проведения исследований конденсированных сред и биологических систем методами рассеяния нейтронов. В каналах вывода формируются пучки нейтронов, которые направляются на специализированные установки, каждая из которых оборудована системой детектирования нейтронного излучения, адаптированной к методике измерений, применяемой на установке.

Важную роль в поддержании работоспособности и развитии экспериментальных установок выполняет Научно-экспериментальный отдел комплекса спектрометров (НЭОКС) ИБР-2. Одним из важнейших направлений деятельности НЭОКС ИБР-2 является развитие и создание детекторных технологий, на основе которых создаются детекторы для экспериментальных установок.

В данном докладе будут представлены существующие разработки Сектора №1 НЭОКС ИБР-2 в области детекторов для регистрации нейтронов и электроники сбора и накопления данных, а также возможные направления развития в будущем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Levchanovski F.V., Gebauer B., Litvinenko E.I., Nikiforov A.S. [и др.] / A PCI DAQ board for MWPC detectors with high-rate 2D-delay line position readout // NIM Section A. 2004. Vol. 529. P. 413-416.
2. Kuzmin E.S., Balagurov A.M., Bokuchava G.D., Kudryashev V.A. et al., Detector for the FSD Fourier Diffractometer based on ZnS(Ag)/6LiF Scintillation Screen and Wavelength shifting Fibers Readout. Pre-print of JINR of E13-2001-204.
3. Белушкин А.В., Богдзель А.А., Журавлёв В.В. Пантелеев Ц.Ц [и др.] / Двухкоординатный позиционно-чувствительный детектор тепловых нейтронов // Журнал технической физики. 2008. Том 78, вып. 1.

ЦИФРОВАЯ СИСТЕМА ОБРАБОТКИ ДЕТЕКТОРНЫХ СИГНАЛОВ С ОДНОМЕРНОГО ПОЗИЦИОННО-ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ДЕТЕКТОРА НА ОСНОВЕ ГЕЛИЕВОЙ РЕЗИСТИВНОЙ ТРУБКИ НА БАЗЕ OPEN FPGA ДИДЖИТАЙЗЕРА

А. А. Богдзель, А. А. Козляковская*, Е. И. Литвиненко, В. М. Милков

Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна, РФ

*e-mail: nasta94@jinr.ru

В работе представлены основные этапы создания пользовательских прошивок для диджитайзера с открытой ПЛИС, для ускорения и удобства разработки которых компания Nuclear Instruments совместно с CAEN разработали программное обеспечение Sci-Compiler, который вместо стандартных языков программирования VHDL/Verilog использует набор готовых библиотек для последующей генерации кода. Подробно рассмотрены алгоритмы работы библиотечных IP блоков высокого уровня, а также проведено сравнение трёх методов обработки детекторных сигналов с газового одномерного позиционно-чувствительного детектора с резистивной нитью. На рисунке 1 представлены основные блоки проекта для сравнения трёх методов: QDC, MCA HP и PSD.

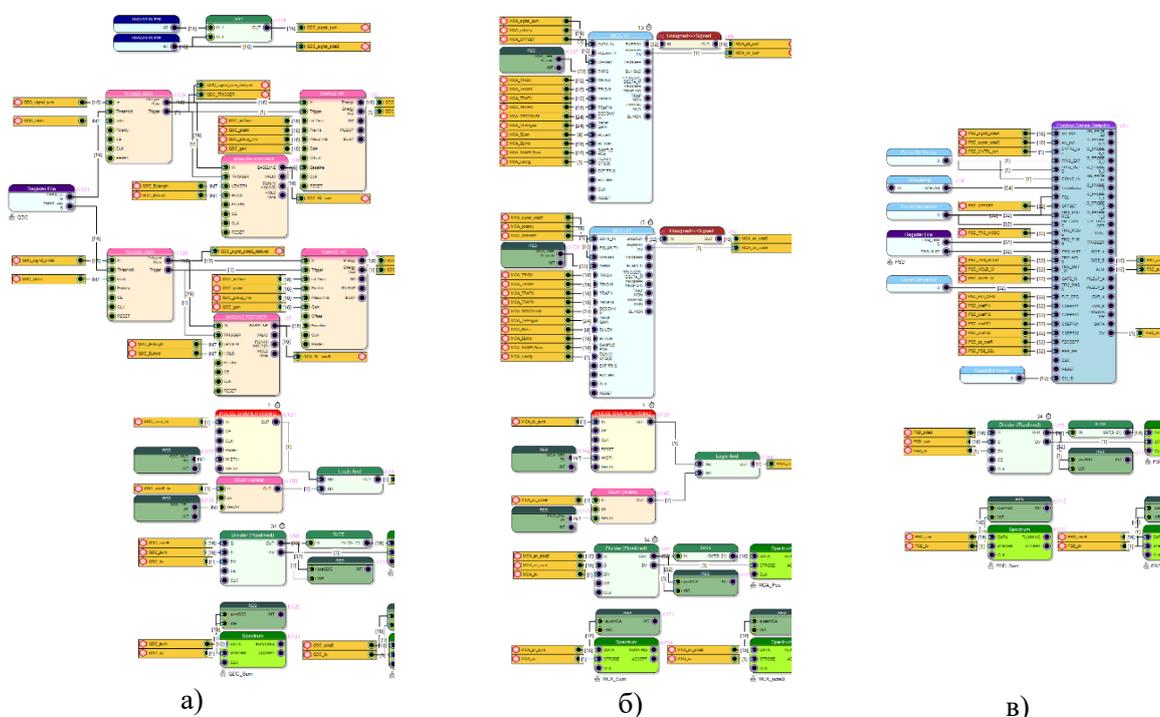


Рисунок 1. Графическая схема трёх методов обработки данных с детектора в проекте Sci-Compiler а) QDC, б) MCA HP и в) PSD.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № 075-10-2021-115 от 13 октября 2021 г. (внутренний номер 15.СИН.21.0021).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lin Zhu, Jian-rong Zhou, Xijin-feng Jiang, Xiao-juan Zhou and oth. Development of ^3He -filled linear position-sensitive detector for neutron scattering instruments at CSNS // Radiation Detection Technology and Methods . — 2022. — № 7. — С. 100-106.
2. Glenn F. Knoll Radiation Detection and Measurement — fourth ed.. — USA: John Wiley & Sons, Inc., 2010 — 830 с.
3. В.Е. Fischer A digital processor for position sensitive detectors // Nuclear instruments and methods. — 1977. — № 141. — С. 173-181.

СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МОНОКРИСТАЛЛОВ LiInSe₂ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ.

О. Даулбаев^{1,2}, Л.И. Исаенко^{3,4}, А.А. Богдзель¹, С.И. Лобанов^{3,4}, П.Г. Криницын^{3,4},
В.М. Милков¹, А.В. Белушкин^{1,5,6*}

¹Лаборатория нейтронной физики им. И.М.Франка,
Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, РФ

²Институт ядерной физики, Алматы, Казахстан

³Новосибирский государственный университет, Новосибирск, РФ

⁴Институт геологии и минералогии, СО РАН, Новосибирск, РФ

⁵Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, РФ

⁶Институт физики, Казанский Федеральный Университет, Казань, РФ

*olzhas.daulbayev@yandex.ru

В данной работе приведены исследования двух монокристаллов LiInSe₂, выращенных при различных условиях. Исследованы сравнительные характеристики указанных кристаллов для регистрации нейтронов методами регистрации сцинтилляции вследствие захвата нейтрона ядрами лития и последующего испускания заряженных частиц, а также традиционным методом съема заряда с поверхностей монокристаллов за счет той же ядерной реакции. Сделаны выводы о перспективах использования монокристаллов LiInSe₂ для различных типов нейтронных детекторов.

Рост кристаллов выполнен в рамках государственного задания ИГМ СО РАН.

"Результаты получены" при финансовой поддержке Российской Федерации в лице Министерства науки и высшего образования, соглашение №075-10-2021-115 от 13 октября 2021 г. (внутренний номер 15.СИН.21.0021).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nikolic R. J., Cheung Chin Li, Reinhardt C. E., Wang T. F. // "Future of Semiconductor Based Thermal Neutron Detectors" (2006). Barry Chin Li Cheung Publications. 14.
2. McGregor D.S., Hammig M.D., Yang Y.-H. e.a// NIM A. 2003. V. 500, Issues (1-3), P. 272.
3. Tupitsyn E., Bhattacharya P., Roweet E. e.a. // Appl. Phys. Lett. 2012. V.101. P. 202101.
4. Herrera E., Hamm D., Wiggins B. e.a. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. 2016. V.833. P.142.
5. Isaenko L., Yelisseyev A., Lobanov S., e.a. // Journal of Applied Physics. 2002. V.91. No.12. P.9475.
6. W. Hönle, G. Kühn, H. Neumann HZ. // Zeitschrift für anorganische und allgemeine Chemie. 1986. - V.532. - pp. 150-156.
7. Lukosi E., Onken D., Hamm D. e.a. // Journal of Luminescence. 2019. V.205. P.346.
8. Lukosi E.D., Herrera E.H., Hamm D.S. e.a // Nuclear Inst. and Methods in Physics Research. 2017. V.A 872. P.181.
9. Bell J. E., Stowe A.C., Burger A., Stassun K.G. // Optical Materials. 2021. V.112. P.110798.
10. http://www.vniia.ru/production/incl/prospekt_element.pdf
11. А.М. Балагуров, А.И. Бескровный, В.В. Журавлев, Г.М. Миронова, И.А. Бобриков, Д. Неов*, С.Г. Шеверёв // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2016, №5, с. 3-16.
12. Драгунов Ю.Г., Третьяков И.Т., Лопаткин А.В. и др // Атомная энергия. 2012. 113. В.1. С.29.
13. <https://consensus-group.ru/katalog/neutron-counters/proportional/63-gelij-18190-80oc>

ОСОБЕННОСТИ МАГНИТНОГО УПОРЯДОЧЕНИЯ В ТОНКОЙ ПЛЁНКЕ Ho

Д.И. Девятериков¹, Е.А. Кравцов^{1,3}, В.Д. Жакетов², Ю.В. Никитенко², Проглядо В.В.¹,
Степанова Е.А.³

¹ИФМ УрО РАН, Екатеринбург, Россия

²ОИЯИ, Дубна, Россия

³УрФУ, Екатеринбург, Россия

В докладе изложены результаты исследования магнитной структуры тонкой плёнки Ho методами нейтронной рефлектометрии и магнитометрии. Объёмные монокристаллы Ho обладают сложной H-T магнитной фазовой диаграммой, для этого редкоземельного металла характерно существование периодического геликоидального магнитного упорядочения в широком диапазоне температур и полей, которое при температурах ниже 20 К и малых значениях внешнего магнитного поля может трансформироваться в коническое магнитное упорядочение с периодом, соизмеримым с параметром решётки с Ho [1,2]. При этом известно [4], что в тонких плёнках Ho возникают существенные отличия в температурах магнитных фазовых переходов.

В настоящей работе, удалось прийти к следующим заключениям:

1) В плёнке Ho формируется периодическое магнитное упорядочение при температурах, ниже T_N для объёмного Ho, однако дальнейшее уменьшение температуры не приводит к формированию соизмеримой конической фазы

2) Воздействие магнитного поля в плоскости образца приводит к формированию всерной магнитной фазы, а затем — ферромагнитной фазы.

3) При величине внешнего магнитного поля 10 кЭ, плёнка Ho демонстрирует температурный гистерезис и сложное поведение ZFC зависимости, интерпретация которого затруднена без проведения дополнительных исследований.

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «Спин» № 122021000036-3).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Magnetic and magnetothermal properties, and the magnetic phase diagram of single-crystal holmium along the easy magnetization direction [Текст]/ V.I. Zverev, A.M. Tishin, Z. Min, K. A. Gschneidner Jr, V. K. Pecharsky// J. Phys.: Condens. Matter.– 2015.– Vol. 27. – P. 146002.
2. Magnetic structure of holmium [Текст]/ M.J. Pechan, C. Stassis// J. Appl. Phys.– 1984.– Vol. 55. – P. 1900.
3. Finite-Size Effect on Magnetic Ordering Temperatures in Long-Period Antiferromagnets: Holmium Thin Films [Текст]/ E. Weschke, H. Ott, E. Schierle, C. Schüßler-Langeheine, D. V. Vyalikh, G. Kaindl, V. Leiner, M. Ay, T. Schmitte, H. Zabel, P. J. Jensen// Phys. Rev. Lett.– 2004.– Vol. 93, N 15. – P. 157204.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ И МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ СИСТЕМ Fe/MgO/Gd

Е. А. Кравцов^{1,2}, Д. И. Девятериков¹, В. В. Проглядо¹, Е. М. Якунина^{1}*

¹ Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия

² Уральский Федеральный Университет, Екатеринбург, Россия

*e-mail: eyakunina@imp.uran.ru

С развитием спинтроники, исследования магнитного поведения, формирующегося в металлических многослойных наноструктурах в результате добавления слоев MgO становится особенно важными, поскольку их взаимодействие с атомами металлов создает сложные эффекты, влияющие на формирование магнитных свойств всей структуры [1,2]. Как показали наши недавние исследования [3,4], процессами перемагничивания в ферромагнитных слоях можно управлять, помещая слои MgO между металлическими слоями, а также изменяя их толщину. Можно ожидать, что расположение MgO относительно различных типов металлических слоев, а также их толщина будут определять сложные магнитные конфигурации в таких наноструктурах.

В настоящей работе были исследованы комплексные структурные и магнитные свойства серии многослойных систем Nb(200 Å)/Fe(10 Å)/MgO(t Å)/Gd(10 Å)/Nb(30 Å) с различной толщиной слоев диэлектрика MgO (t = 0, 4, 8 и 12 Å). Толщину слоев и среднеквадратичную шероховатость границы раздела определяли методом рефлектометрии. На рисунке 1 представлены результаты рефлектометрических исследований наноструктур и результаты их обработки.

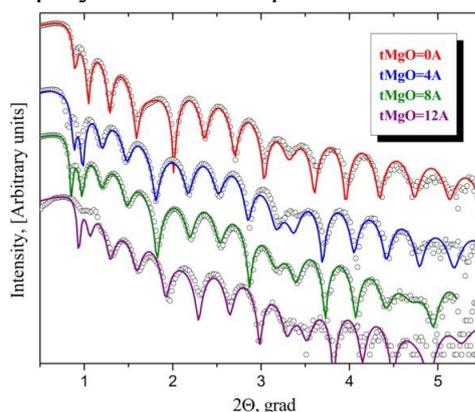


Рисунок 1. Экспериментальные рентгеновские рефлектограммы и модельные кривые для образцов с толщинами слоёв MgO 0, 4, 8 и 12 Å соответственно.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России (тема «Спин», № 122021000036-3). Эксперименты выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Соглашения № 075-15-2022-830 от 27 мая 2022 г. (продолжение Соглашения № 075-15-2021-1358 от 12 октября 2021 г.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hellman F., Hoffmann A., Tserkovnyaket al Ya. Interface-induced phenomena in magnetism // Reviews of Modern Physics, 2017, № 89, 025006.
2. Yu G.-H., Peng W.-L., Zhang J.-Ya. // RareMetals, 2017, № 36, 155–167
3. Якунина Е. М., Кравцов Е. А., Хайдуков Ю. Н. и др. Структура и магнетизм в многослойных наносистемах Fe/MgO/Cr/MgO/Fe // Поверхность. Рентгеновские, синхронные и нейтронные исследования, 2021, № 8, 16-22 с.
4. Якунина Е. М., Кравцов Е. А., Хайдуков Ю. Н. и др. Синтез, структура и магнитные свойства многослойных наногетероструктур Fe/MgO/Cr/MgO/Fe // Физика твердого тела, 2021, № 9, 1306 с.

УПРАВЛЯЕМАЯ МОДИФИКАЦИЯ ГИДРИРОВАНИЕМ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ СВЕРХРЕШЁТОК Fe/Gd

И.А. Лихачёв¹, А.А. Рыжова^{2}, Ю.А. Саламатов², В.В. Проглядо*

¹ Научный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

² Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения РАН (ИФМ УрО РАН), Екатеринбург, Россия

*e-mail: a.a.ryzhova@imp.uran.ru

В данной работе исследовалось влияние гидрирования на структурные свойства магнитных сверхрешеток вида Si/Nb(10 нм)[Fe(3.5 нм)/Gd(x нм)]₂₀, где x=1,2,5,10 нм. Образцы помещались в атмосферу водорода при давлении 720 торр при температурах в диапазоне от 300 К до 400 К на 5 часов, изменение структурных свойств контролировалось ex-situ с помощью рентгеновской дифрактометрии и рефлектометрии, а также просвечивающей электронной микроскопии.

Анализ данных экспериментальных данных позволил установить факт проникновения водорода на всю глубину образца в концентрациях, достаточных для перехода атомов Gd в химически связанное состояние с образованием гидридов GdH₂ и для ряда образцов GdH₃. Во всех образцах было обнаружено увеличение толщины Gd-содержащего слоя вплоть до 41% от исходного, подобное наблюдавшемуся ранее в аналогичных системах [1]. При этом, была обнаружена сильная зависимость фазового состава и относительного утолщения Gd-содержащих слоёв от исходной толщины слоя Gd, в частности, минимальное относительное утолщение достигается в образцах, где нет следов присутствия GdH₃. Произведённая с помощью высокоразрешающей ПЭМ оценка размера кристаллитов GdH₂ и GdH₃ и распределения их в Gd-содержащем слое показала, что кристаллиты занимают от трети до полной толщины слоя и распределены в нём равномерно, что противоречит ранее полученным результатам для плёнок Gd [2]. Таким образом, была экспериментально доказана возможность гидрирования сверхрешеток Fe/Gd с каталитическим слоем Ni и показана возможность управления фазовым составом гидрированных слоёв путём подбора толщины исходного слоя.

Работы проводились в рамках госзадания Минобрнауки России (тема «Спин», № 122021000036-3), при финансовой поддержке ИФМ УрО РАН (молодёжный проект ИФМ УрО РАН м 17-22), Российской Федерации в лице Министерства науки и высшего образования, соглашение №075-10-2021-115 от 13 октября 2021 г. (внутренний номер 15.СИН.21.0021) и соглашение №075-15-2021-1350 от 5 октября 2021 г. (внутренний номер 15.СИН.21.0004).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kamada Y., Itoh A., Takama D., Yamamoto M. Effects of Hydrogenation on the Structure, Transport, and Magnetic Properties of Multilayers Composed of Transition Metals and Rare-Earth Metals. Transactions of the Magnetics Society of Japan Vol. 2, No. 2 May 2002 – Pp. 69-75.
2. Manassen Y., Realpe H., Schweke D. Dynamics of H in a Thin Gd Film: Evidence of Spinodal Decomposition. Journal of Physical Chemistry C Vol. 123, Iss 18 May9 2019 – Pp. 11933-11938

МАГНИТНАЯ СТРУКТУРА СВЕРХРЕШЕТОК Dy/Co

М.В. Макарова¹, Е. А. Кравцов^{1,2}, Д.И. Холин³, Ю.Н. Хайдуков⁴

¹Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург

²Уральский федеральный университет, Екатеринбург

³Институт физических проблем им. П.Л. Капицы РАН, Москва

⁴Институт физики твердого тела общества Макса Планка, Штутгарт, Германия

УДК: 537.622.6, 539.216.2

Сплавы и сверхрешетки на основе переходных и редкоземельных металлов (ПМ-РЗ) являются перспективными материалами для магнитооптической записи и хранения информации [1, 2]. Недавно в системах ПМ-РЗ (DyCo, TbCo, FeCoGd, Tb/Co и др.) появилась возможность переключения намагниченности системы без внешнего магнитного поля с помощью фемтосекундного пульсирующего лазера [1]. Аморфные пленки DyCo, представляют собой ферромагнетик с высокой одноосной перпендикулярной анизотропией и большими величинами коэрцитивной силы в области компенсационных составов. Сверхрешетки с тонкими слоями Dy, Co представляют собой композиционно-модулированный сплав, с одной стороны выдерживается строгая периодичность в толщинах и композиции слоев, а с другой стороны, интердиффузия Co и Dy на межслойных границах приводит к периодическому изменению с глубиной концентрации Co и Dy. [3].

Сверхрешетки [Dy (12 Å)/Co(12/30 Å)]₄₀ изготовлены методом высоковакуумного магнетронного распыления на монокристаллических подложках (001)Si. При исследовании магнитных свойств использовали взаимодополняющие методы с элементарным разрешением (рентгеновский магнитный круговой дихроизм) и с разрешением по глубине (рефлектометрия поляризованных нейтронов). Получены распределения средних магнитных моментов в слоях. Показали, что перпендикулярная магнитная анизотропия в Co/Dy обусловлена перпендикулярной ориентацией намагниченности в слоях CoDy, в то время как намагниченность слоев Co ориентирована в плоскости образца.

Синтез образцов выполнен в Центре коллективного пользования ИФМ УрО РАН в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема "Спин" № АААА-А18-118020290104-2). Эксперименты по рефлектометрии поляризованных нейтронов и анализ экспериментальных нейтронографических данных выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Соглашения №075-10-2021-115 от 13.10.2021 г..

1. S. Mangin, M. Gottwald, C.-H. Lambert, D. Steil, Nature Materials 13, 286 (2014).
2. Z. S. Shan, D. J. Sellmyer, S. S. Jaswal et al., Phys. Rev. Letters. 63, 4 (1989).
3. I. A. Subbotin, E.M. Pashaev, A.L. Vasiliev et al., Physica B. 573, 28. (2019).

МЕТОД РЕЗОНАНСНОЙ НЕЙТРОННОЙ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МАГНИТНЫХ ПЛЕНОК

Е. С. Никова^{1}, Ю. А. Саламатов¹, Е. А. Кравцов^{1,2}*

¹ Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

² Уральский федеральный университет им. Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

* e-mail: nikova@imp.uran.ru

Уникальные возможности рефлектометрии поляризованных нейтронов (РПН) весьма востребованы при изучении магнитных свойств и характеристик слоев многослойных металлических наногетероструктур. При обычной постановке эксперимента получают интенсивность отражения, которая является квадратом модуля комплексной функции, называемой амплитудой отражения. Информация о фазе этой функции теряется, и это препятствует однозначной интерпретации рефлектометрического эксперимента.

Для решения этой проблемы нами предложен экспериментальный подход, являющийся модификацией метода опорного слоя, предложенного в [1, 2] для исследования полимерных пленок. Сущность метода заключается в том, что на поверхность исследуемого образца наносится опорный слой гадолиния с известными характеристиками. Ядра двух его изотопов (^{155}Gd и ^{157}Gd) взаимодействуют с тепловыми нейтронами резонансным образом. Это приводит к тому, что плотность длины рассеяния гадолиния зависит от энергии нейтронов. Следует отметить, что исследуемая часть образца в своем составе не должна содержать гадолиний. При измерении интенсивности отражения при трех различных углах падения от такой комбинированной структуры можно однозначно восстановить амплитуду отражения исследуемого образца. При хорошем качестве эксперимента знание комплексной амплитуды отражения даёт возможность модельно-независимого анализа потенциала взаимодействия, как ядерного, так и магнитного.

Предложенный метод успешно апробирован на модельных численных расчётах и на экспериментальных данных для немагнитных и магнитных образцов. Часть результатов была представлена в [3]. Измерения проводились на времяпролётных рефлектометрах РЕФЛЕКС и РЕМУР реактора ИБР-2 (ОИЯИ, г. Дубна). Результаты данных исследований будут использованы при подготовке диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема “Спин” 122021000036-3) и при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Соглашения № 075-15-2022-830 от 27 мая 2022 г (продолжение Соглашения № 075-15-2021-1358 от 12 октября 2021г).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Majkrzak C. F. and Berk N. F.. Exact determination of the phase in neutron reflectometry// Physical Review B. 1995. V. 52. Pp. 10827–10830.
2. de Haan V.O., van Well A.A., Sacks P.E., Adenwalla S. and Felcher G.P.. Toward the solution of the inverse problem in neutron reflectometry// Physica B. 1996. V. 221. Pp. 524–532.
3. Никова Е.С., Саламатов Ю.А., Кравцов Е.А. Резонансная нейтронная рефлектометрия на компактном источнике нейтронов // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2023. V. 7. 102—107 с.

ПОЗИЦИОННО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ДЕТЕКТОР ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ НА ОСНОВЕ ПЛОСКО-ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РЕЗИСТИВНОЙ КАМЕРЫ С ^{10}B

М.О. Петрова

Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна, РФ

*e-mail: mbelova@jinr.ru

В докладе будет рассмотрена применимость и особенности работы ^{10}B -ППРК как детектора тепловых и холодных нейтронов в нейтронографических экспериментах. Методом Монте-Карло исследовано рассеяние и поглощение нейтронного пучка конструктивными элементами детектора, вероятность конвертации и выхода продуктов реакции из пленки конвертера. Получены и интерпретированы рентгеновские рефлектометрические кривые для изготовленных пленок-конвертеров. Измерен спектр гамма-излучения реакции конвертации, приведены результаты измерений ^{10}B -ППРК с лабораторным источником ^{252}Cf и диджитайзером CAEN.

СРАВНЕНИЕ ДВУХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ С НЕЙТРОННЫХ СЧЁТЧИКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ ЭКРАНОВ ${}^6\text{LiF/ZnS(Ag)}$ И ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН С ПЕРЕИЗЛУЧАТЕЛЕМ СПЕКТРА.

*М.М. Подлесный**, А.А. Богдзель, В.М. Милков, В.И. Боднарчук
Объединённый институт ядерных исследований, 141980 Дубна, РФ
*e-mail: podlesny@phystech.edu

Эффективность выделения нейтронного сигнала с детекторов на основе сцинтиллятора ${}^6\text{LiF/ZnS(Ag)}$ является актуальной задачей, поскольку она напрямую влияет на эффективность детектора. Использование оптических волокон расширяет возможности применения сцинтилляционных экранов для детекторов нейтронов, однако они также вносят вклад в количество передаваемого света и форму наблюдаемых сигналов.

В работе представлены основные результаты исследования по сравнению зарядового метода обработки сигналов [1] (Pulse shape discrimination - PSD) с реализованным на детекторе АСТРА [2] цифровым фильтром по длительности сигнала [3]. Исследование выполнено при различных интенсивностях нейтронного потока на один канал регистрации (от 300 до 27000 событий/с). Сигнал с фотоэлектронного умножителя подавался на усилитель сигнала с встроенными интегрирующим RC-фильтром с постоянной формирования сигнала 45 нс, 140 нс или 300 нс. С усилителя сигнал подавался одновременно на блок MPD-32 [4] и дигитайзер N6730 фирмы Caen [5].

Результат исследования показал большую поддерживаемую загрузочную способность и эффективность выделения нейтронного сигнала у зарядового метода. При доле ложных срабатываний метода <5% при загрузке 27000 нейтронов/с на один канал регистрации потери в счёте составили ~20-33%. Метод отбора сигнала по его длительности при той же загрузке показал потери в счёте ~66%, что двукратно превышает потери зарядового метода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bertrand G. H. V. Pulse shape discrimination between (fast or thermal) neutrons and gamma rays with plastic scintillators: State of the art / Bertrand G. H. V., Hamel M., Normand S., Sguerra F. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2015. – Vol. 776. – P. 114–128.
2. А. В. Белушкин, А. А. Богдзель, В. И. Боднарчук, О. Даулбаев, В. В. Журавлев, А. К. Курилкин, С. А. Куликов, Е. И. Литвиненко, В. М. Милков, М. О. Петрова, В. И. Приходько, М. М. Подлесный, А. В. Чураков, В. В. Швецов. Опыт разработки и создания детекторов тепловых нейтронов в НЭОКС ИБР-2 // Приборы и техника эксперимента. – 2022. – №. 5. – С. 1–13.
3. Combes C., Dorenbos P., Hollander R., Eijk C. A thermal-neutron scintillator with n/Oi discrimination $\text{LiBaF}_3\text{:Ce,Rb}$ // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 1998. – V. 416, no. 2. – P. 364-370.
4. Bogdzel A. The new data acquisition system MPD-32 for the High-Resolution Fourier Diffractometer at the IBR-2 pulsed reactor / Bogdzel A., Drozdov V., Kruglov V., Murashkevich S., Prikhodko V., Shvetsov V. // NEC'2019 Becici, 2019. – P. 142.
5. 8 Channel 14-bit 500 MS/s Digitizer. – URL: <https://www.caen.it/products/n6730>

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЙТРОНОВОДНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ КИН DARIA

А. И. Попов^{1,2}, Е. А. Кравцов^{1,2}, Н.О. Антропов²

¹Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина,
г. Екатеринбург, Россия

²Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

Современные тенденции в нейтронной физике состоят в выводе из эксплуатации среднепоточных нейтронных реакторов и строительстве вместо них крайне ограниченного числа высокопоточных источников нейтронов. Пучковое время на этих реакторах будет крайне ограничено и, скорее всего, будет предполагать проведение исключительно уникальных экспериментов. Большинство задач в исследованиях конденсированных сред не требуют таких больших потоков нейтронов и решаются на среднепоточных реакторах. Выходом является строительство компактных источников нейтронов, в которых за счет оптимизации небольшого числа инструментов можно добиться тех же потоков нейтронов, как и на среднепоточных реакторах.

Нейтроны на компактном источнике получают за счет низкоэнергетических реакций при бомбардировке протонами мишени, причем, при этом не производятся и используются делящиеся материалы, и установка является экологически чистой. Консорциумом из ведущих российских нейтронных центров разрабатывается проект DARIA (compact neutron source Dedicated to Academic Research and Industrial Applications) по созданию в России сети компактных источников нейтронов, пилотный проект планируется реализовать в Екатеринбурге. Строительство прототипа компактного источника нейтронов DARIA является одной из приоритетных целей для развития различных сфер науки и техники в области физики твердого тела на Урале. На компактном источнике может быть установлено 1-2 мишеней сборки, до 5 различных нейтронных инструментов на каждой.

В настоящем докладе рассматриваются прототипы установок дифрактометра и рефлектометра, предлагаемых к реализации на КИН DARIA. Рассмотрены особенности геометрической конструкции нейтронной системы, а так же вариации реализации time of flight методики на основе дисковых прерывателей.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Соглашения № 075-15-2022-830 от 27 мая 2022 г. (продолжение Соглашения № 075-15-2021-1358 от 12 октября 2021г).

МНОГОДЕТЕКТОРНЫЙ ДИФРАКТОМЕТР СФЕРА

Р. А. Садыков¹, Д. Н. Трунов^{1*}, В. Н. Марин¹, В. С. Литвин¹, С. Н. Аксенов¹,
Д. А. Бучный¹

¹ Институт ядерных исследований РАН, Москва, Троицк, 108840 Россия

* e-mail: dtrunov@inr.ru

В рамках этой работы стояла цель создания современного времяпролетного многосекционного дифрактометра СФЕРА, который будет использовать на источнике РАДЭКС ММФ ИЯИ РАН, а также перспективное его использование в составе установок расположенный на проектируемых компактных источниках нейтронов. Дифрактометр “СФЕРА” должен быть многофункциональным, иметь высокое разрешения и высокую эффективность регистрации нейтронов.

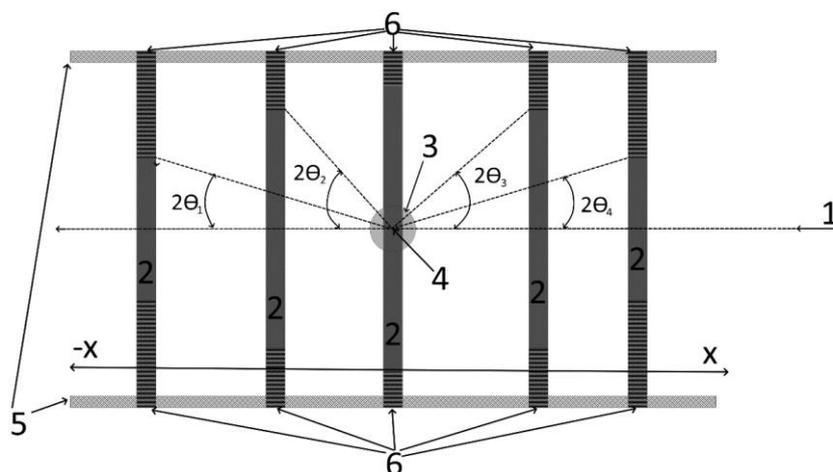


Рисунок 1 – Принцип работы сфера

На рисунке 1 изображена схема дифрактометра “СФЕРА”. Дифрактометр сфера состоит из двух направляющих (5), закрепленных на общем основании, параллельных оси пучка нейтронов (1). По направляющим перемещаются кольцевые детекторы (2) с помощью независимых шаговых двигателей. Каждое кольцо содержит защиту от фоновых нейтронов из борсодержащего материала (2) и прямоугольные сцинтилляционные счетчики нейтронов (7) на внутренней стороне кольца, которые образуют правильный многогранник. Кольца имеют различный радиус для того, чтобы образец всегда оставался в прямой видимости, и имеют крепление (6) различной длины для крепления колец на двух направляющих. Также на оси пучка с помощью держателя (3) закреплен образец (4).

Результаты получены при финансовой поддержке Российской Федерации в лице Министерства науки и высшего образования, соглашение №075-10-2021-115 от 13 октября 2021 г. (внутренний номер 15. СИН.21.0021).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Д. А. Бучный, В. С. Литвин, Д. Н. Трунов [и др.], Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2022. – № 12. – С. 38-47.
2. В. Н. Марин, Р. А. Садыков, Д. Н. Трунов [и др.] // Приборы и техника эксперимента. – 2018. – № 1. – С. 5-12.
3. Патент № 2782417 С1 Российская Федерация, МПК G01T 1/208. Устройство для регистрации излучения: № 2022105038: заявл. 25.11.2021; опублик. 26.10.2022 / Д. Н. Трунов, В. Н. Марин, Е. В. Алтынбаев; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение "Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константина Национального исследовательского центра "Курчатовский институт"

МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РАСПРОСТРАНЕНИЯ НЕЙТРОНОВ В МНОГОСЛОЙНЫХ СТРУКТУРАХ МЕТОДОМ ФАЗОВО-АМПЛИТУДНЫХ ФУНКЦИЙ

*Ю. А. Саламатов**, *Е. А. Кравцов*

¹ Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия

*e-mail: salamatov@imp.uran.ru

Метод фазово-амплитудных функций является подходом к анализу широкого круга задач квантовой механики и позволяет свести решение уравнения Шрёдингера (имеющего второй порядок) к решению уравнения для фазовой (или амплитудной) функции, которое имеет первый порядок [1].

В настоящей работе данный метод адаптирован к задачам нейтронной рефлектометрии. Показано, что процесс распространения нейтронов в слоистой среде может быть описан системой из двух уравнений первого порядка. Уравнение для коэффициента отражения нелинейное, но может быть решено независимо, поскольку в него не входит коэффициент прохождения. Уравнение для коэффициента прохождения линейное и может быть решено, если известен коэффициент отражения. Зная коэффициенты отражения R и прохождения T , можно определить коэффициент поглощения μ из закона сохранения числа частиц: $\mu = 1 - R - T$.

В случае поляризованных нейтронов уравнения принимают матричный вид. К плюсам этого метода можно отнести меньшие вычислительные затраты (уравнения записываются для матриц 2×2 , тогда как в подходе Абеле применяются матрицы 8×8) и, соответственно, более высокую скорость вычислений. Также, использование фазово-амплитудных функций упрощает моделирование и анализ систем со сложным магнитным упорядочением, в частности, с геликоидальным упорядочением моментов.

Уравнение для расчёта коэффициентов отражения в методе фазово-амплитудных функций имеет вид:

$$\frac{d}{dx} V = (E^+ + VE^-)V(E^+ + VE^-). \quad (1)$$

Все величины, входящие в него, являются матрицами 2×2 и описывают 4 возможных канала рассеяния нейтронов – два канала с сохранением спина и два канала с изменением спина. Матрица V включает в себя комплексные коэффициенты отражения нейтронов. Матрица E^+ описывает падающую волну, E^- - отражённую. Матрица V содержит информацию о потенциале взаимодействия в различных каналах рассеяния.

Дифференциальное матричное уравнение (1) может быть решено методом Рунге-Кутты, характеристики потенциала в обратной задаче определяются при помощи алгоритма Левенберга-Марквардта, возможно применение и других алгоритмов спуска.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема “Спин” 122021000036-3) и при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Соглашения № 075-15-2022-830 от 27 мая 2022 г. (продолжение Соглашения № 075-15-2021-1358 от 12 октября 2021 г).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабилов В. В. Метод фазовых функций в квантовой механике. М: Наука, 1976. 288 с.

СИНТЕЗ УГЛЕРОДНЫХ ПОКРЫТИЙ НА НАНОЧАСТИЦАХ МЕТАЛЛОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ

Ю.А. Саламатов¹, В.В. Матюхов^{1,2}, Е.А. Кравцов^{1,2}*

¹ Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия

² Уральский Федеральный университет, Екатеринбург, Россия

* e-mail: vladimir.matyukhov@gmail.com

Изучение наночастиц, покрытых углеродной оболочкой, в настоящее время являются достаточно перспективной областью для исследований ввиду перспективности их применения в самых различных отраслях. Особый интерес вызывают наночастицы металлов и диэлектриков покрытых оболочкой графена или графита, однако синтез таких систем достаточно сложен и требует специальное оборудование.

В данном докладе представлены методика и результаты синтеза графенового покрытия на нанопорошках никеля (Ni) и сапфира (Al₂O₃) методом химического осаждения из газовой фазы. Наночастицы были получены на оригинальной установке газофазного синтеза в Институте физики металлов УрО РАН и имели размеры в интервале от 15 до 25 нм. Диагностика синтезированных покрытий проводилась методом рамановской спектроскопии.

Первоначально синтез производился на фольге и таблетке нанопорошка никеля с предварительным отжигом при температуре 1075°C в течении 30 минут для восстановления, образовавшегося в атмосферном воздухе NiO. После отжига для получения системы Ni@Gr в реактор установки химического осаждения из газовой фазы в течении 10 минут подавалась смесь метана и водорода при температуре 1035°C с последующим быстрым охлаждением в потоке чистого водорода. На протяжении всех этапов синтеза давление в реакторе было постоянным и составляло 10 торр.

Спектры комбинационного рассеяния света показали, что на фольге никеля образовался многослойный графен и графит. На таблетке же графен образовался неравномерно и появились области с двуслойным и однослойным графеном. Данный эффект связан с процессом спекания порошка в процесс отжига. Отсутствие на спектрах пика D свидетельствует о высоком качестве кристаллической структуры графена.

Чтобы избежать процесса спекания наночастиц было предложено использовать не чистый нанопорошок никеля, а смесь нанопорошков никеля и сапфира, при неизменных параметрах синтеза. Спектры рамановской спектроскопии показали, что добавления сапфира незначительно увеличивает количество слоев графена и добавляет дефекты в кристаллической структуре графена.

Синтез графенового покрытия был также произведен для чистого порошка сапфира. В результате на нем образовался двух-трехслойный графен с большим количеством дефектов.

Таким образом, в данной работе была показана возможность синтеза углеродного покрытия на наночастицах никеля и сапфира методом химического осаждения из газовой фазы. На частицах чистого никеля образуются 1-2 слоя графена с высоким качеством кристаллической структуры, но нанопорошок подвержен спеканию. Чтобы предотвратить спекание можно использовать смесь нанопорошков никеля и сапфира, что незначительно ухудшит качество графенового слоя. Учитывая, что никель обладает магнитными свойствами, полученные системы представляют интерес для исследования методом малоуглового рассеяния поляризованных нейтронов.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России (тема «Спин», № 122021000036-3). Эксперименты выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Соглашения № 075-15-2022-830 от 27 мая 2022 г. (продолжение Соглашения № 075-15-2021-1358 от 12 октября 2021 г).

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СВИНЕЦА-208 В КАЧЕСТВЕ ОТРАЖАТЕЛЯ РЕАКТОРА НЕПТУН

А.А. Хассан

Объединённый институт ядерных исследований, г. Дубна, РФ

*e-mail: AKhassan@mephi.ru

Аннотация

Как было показано раньше [1-4], получение времени жизни поколения нейтронов, равного 30 нс, возможно при добавлении высокообогащённого урана (90%). Однако, чтобы ограничить распространение ядерного оружия, Международное агентство по атомной энергии рекомендует использовать в исследовательских реакторах уран, обогащённый не более чем на 20%. Для этого в этой части автор предлагают использовать свинец-208 в качестве отражателя нейтронов альтернатива никелю. Увеличение времени жизни поколения нейтронов, необходимого для того, чтобы реактор стал более стабильным и безопасным, оно должно увеличиться с 8 до 30 нс.

Введение

В таблица 1 приведены наименования различных вариантов а.з. и распределение урановых стержней, добавляемых в активную зону реактора. В таблице 2, показано эффект изменения материала отражателя от Ni+Be на Pb-208 на время жизни поколения нейтронов, коэффициента размножения и эффективная доля запаздывающих нейтронов.

Табл. 1. Распределение урановых стержней в рассмотренных вариантах расчётов.

Вариант	Место размещения урановых стержней, содержащих уран, в а.з.	Количество урановых стержней, добавленных в а.з.
В1	а.з. без каких-либо добавок	0
В2	а.з. заменив первый ряд рядом с замедлителем нейтронов со стержнями, содержащими "UN - обогащение 10%"	50
В3	а.з. заменив первый ряд рядом с замедлителем нейтронов со стержнями, содержащими "UN - обогащение 20%"	50
В4	а.з. заменив первый ряд рядом с замедлителем нейтронов со стержнями, содержащими "UN50+NpN50 - обогащение 10%"	50
В5	а.з. заменив первый ряд рядом с замедлителем нейтронов со стержнями, содержащими "UN50+NpN50 - обогащение 20%"	50
В6	а.з. заменив второй ряд рядом с замедлителем нейтронов со стержнями, содержащими "UN - обогащение 10%"	48
В7	а.з. заменив второй ряд рядом с замедлителем нейтронов со стержнями, содержащими "UN - обогащение 20%"	48
В8	а.з., заменив второй ряд рядом с замедлителем нейтронов со стержнями, содержащими "UN50+NpN50 - обогащение 10%"	48
В9	а.з. заменив второй ряд рядом с замедлителем нейтронов со стержнями, содержащими "UN50+NpN50 - обогащение 20%"	48

B10	а.з. заменив некоторые стержни во втором и третьем рядах рядом с замедлителем нейтронов со стержнями, содержащими "UN - обогащение 10%"	44
B11	а.з. заменив некоторые стержни во втором и третьем рядах рядом с замедлителем нейтронов со стержнями, содержащими "UN - обогащение 20%"	44
B12	а.з. заменив некоторые стержни во втором и третьем рядах рядом с замедлителем нейтронов со стержнями, содержащими "UN50+NpN50 - обогащение 10%"	44
B13	а.з. заменив некоторые стержни во втором и третьем рядах рядом с замедлителем нейтронов со стержнями, содержащими "UN50+NpN50 - обогащение 20%"	44
B14	а.з. заменив некоторые стержни во втором и третьем рядах рядом с замедлителем нейтронов со стержнями, содержащими "UN - обогащение 5%"	44
B15	а.з. заменив второй ряд рядом с замедлителем нейтронов со стержнями, содержащими "UN60+NpN40 - обогащение 10%"	48
B16	а.з. заменив второй ряд рядом с замедлителем нейтронов со стержнями, содержащими "UN40+NpN60 - обогащение 20%"	48

Табл. 2. Время жизни нейтронов, эффективный коэффициент размножения и эффективная доля запаздывающих нейтронов для вариантов B1-B16 при использовании отражатель из Pb-208.

Вариант	Время жизни поколения нейтронов, нс	K-эфф	β-эфф, е-3
B1	10,7	1,016	1,3433
B2	821,4	1,003	1,4309
B3	943,9	1,010	1,4693
B4	263,3	1,007	1,3693
B5	415,5	1,012	1,3987
B6	58,8	0,989	1,3984
B7	68,6	0,996	1,4618
B8	27,2	1,001	1,3703
B9	37,2	1,005	1,4145
B10	33,3	0,984	1,4186
B11	34,3	0,992	1,4657
B12	18,0	0,997	1,3722
B13	22,3	1,002	1,3897
B14	27,23	0,980	1,3709
B15	30,31	0,998	1,3693
B16	30,87	1,007	1,3783

Вывод

Результаты доказали возможность увеличения времени жизни нейтронов в реакторе Нептуна за счёт добавления в активную зону реактора низкообогащённого урана с необходимостью замены отражателя нейтронов с бериллия-никеля на свинец-208 без необходимости использования фильтра медленных нейтронов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hassan, A.A. and E.P. Shabalin, Fourth Generation Neutron Source in Dubna, “Solution of Pulse Power Fluctuation Problem”. *Physics of Atomic Nuclei*, 2021. 84(3): p. 227-236.
2. Shabalin, E.P., et al., Reducing the Level of Power Vibrations in the NEPTUNE Pulsed Reactor. *Physics of Particles Nuclei Letters*, 2021. 18(3): p. 354-369.
3. Аксенов, В.Л., М.В. Рзянин, and Е.П. Шабалин, Исследовательские реакторы ОИЯИ: взгляд в будущее. *ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И АТОМНОГО ЯДРА*, 2021. 52(6): p. 1349-1376.
4. Hassan, A., M. Bulavin, and V. Afanasyev, Optimization of the cold moderator for the new pulsed reactor NEPTUN. *Nuclear Engineering Design*, 2023. 404: p. 112192.

ОПТИМИЗАЦИЯ ИСТОЧНИКА НЕЙТРОНОВ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ПРИМЕНЕНИЙ, ВКЛЮЧАЯ ЛУЧЕВУЮ ТЕРАПИЮ

А.М. Шихада

Чеченский государственный педагогический университет, Грозный, 364068 Россия
e-mail: shihada@tpu.ru

АННОТАЦИЯ

В клинической практике при работе с мишенью, излучающей нейтроны в 4 π -пространстве, всегда требуется концентрировать их в однонаправленный пучок. Это необходимо как для увеличения плотности потока частиц, так и для придания им нужной формы и оптимальной площади поперечного сечения. В принципе, форму пучка можно изменить с помощью коллиматора, что позволяет существенно его сузить и добиться минимального поглощения нейтронов в элементах конструкции. В данной работе были проведены работы по моделированию с использованием кода MCNP5 для выяснения возможности и реальности применения узкого пучка быстрых нейтронов длиной 2 см и менее в лучевой терапии. Моделирование проводилось на оригинальной конструкции лечебного коллиматора 8,5 x 8,5 см², существовавшего в циклотронной лаборатории Томского политехнического университета. Результаты показали, что энергетический спектр нейтронов практически не изменился в быстрой области, а наоборот, при использовании коллиматора с апертурой 2 см поток нейтронов увеличился примерно на 11 %. Пространственные распределения быстрых нейтронов были значительно уже на расстоянии 10 см от апертуры по сравнению с исходной конструкцией 8,5 x 8,5 см². Более узкий и интенсивный пучок нейтронов сохранит здоровые ткани рядом с опухолью, а также сократит сроки лечения, что сделает процедуры лечения более комфортными. Есть основания надеяться, что узкие пучки сделают нейтронно-лучевую терапию при лечении небольших опухолей неправильной формы более точной и безопасной для пациента.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

В целом нейтронные спектры не изменяются в диапазоне энергий от 1 до 13 МэВ. При этом коллиматор с апертурой 2 см без каких-либо дополнительных деталей способен увеличить поток нейтронов примерно на 11 процентов по сравнению с оригинальным коллиматором с апертурой 8,5 x 8,5 см². Кроме того, можно заметить, что низкоэнергетическая (тепловая) составляющая при использовании коллиматора с апертурой 2 см разбавляется в 3 раза. Этот результат имеет решающее значение для уменьшения потока тепловых нейтронов в случае лучевой терапии, поскольку он уменьшает воздействие тепловых нейтронов на здоровые ткани, окружающие опухоль, и уменьшает ненужные дозы облучения. Более того, установлено, что добавление дополнительного небольшого коллиматора из полиэтилена уменьшает количество быстрых нейтронов примерно вдвое, но при этом в несколько раз уменьшает поток тепловых нейтронов. Фактически, уменьшение потока быстрых нейтронов не считается хорошей особенностью в области терапии быстрыми нейтронами, поскольку оно продлевает период лучевой терапии. Кроме того, поток тепловых нейтронов можно уменьшить тонким слоем (фильтром) кадмия или борированных соединений. Добавление слоя свинца не улучшило нейтронный спектр и не способствовало увеличению нейтронного потока. Это связано с тем, что быстрые нейтроны были собраны коническим коллиматором с концом 2 см, и поэтому не существует достаточного количества быстрых нейтронов, которые могли бы столкнуться с внутренним слоем свинца и способствовать увеличению потока нейтронов через реакция (n, 2n).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Schönfeldt, T. Broad spectrum moderators and advanced reflector filters using 208Pb / T. Schönfeldt, et al // Nucl. Instrum. Meth A. – 2015. – V. 769. – P. 1–4.
2. de Haan, V. A high performance neutron moderator design / V. de Haan // Nucl. Instrum. Meth A. – 2015. – V. 794. – P. 122–126.
3. Keith, A.W. Neutrons from Deuteron Bombardment of Light Nuclei. PhD thesis / A.W. Keith // University of Wisconsin, Madison, 1972. – 82 p.
4. da Silva, A.X. Moderator-collimator-shielding design for neutron radiography systems using 252Cf / A.X Da Silva, V.R Crispim // Applied Radiation and Isotopes. – 2001. – V. 54, № 2. – P. 217–225.

