

Репликовые нейтроноводы для экспериментов с ультрахолодными нейтронами

© А.П. Серебров,¹ А.В. Васильев,¹ М.С. Ласаков,¹ Е.В. Сибир,¹ А.Н. Мурашкин,¹
А.И. Егоров,¹ А.К. Фомин,¹ С.В. Сбитнев,¹ П. Гельтенборт,² О. Циммер²

¹ Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константина
Национальный исследовательский центр „Курчатовский институт“,
188300 Гатчина, Ленинградская область, Россия

² Institut Max von Laue–Paul Langevin,
Grenoble, France
e-mail: serebrov@pnpi.spb.ru

(Поступило в Редакцию 20 июня 2016 г.)

Описана методика изготовления нейтроноводов для ультрахолодных нейтронов на основе репликовой технологии. Приведен сравнительный анализ качества репликовых нейтроноводов, нейтроноводов, изготовленных из полированных анодно-механически стальных труб, нейтроноводов из электрополированных труб.

DOI: 10.21883/JTF.2017.01.44030.1939

Ультрахолодные нейтроны (УХН) нашли широкое применение в изучении фундаментальных свойств свободного нейтрона [1]. Поиск электрического дипольного момента нейтрона с помощью УХН [2] представляет один из самых прецизионных экспериментов в физике низких энергий. Измерение времени жизни нейтрона методом хранения УХН в материальной ловушке на сегодняшний день является самым точным [3]. Для всех экспериментов с удержанием УХН в ловушке требуются нейтроноводы, которые с наименьшими потерями доставляют нейтроны от источника УХН до экспериментальной установки.

В зависимости от задач и условий эксперимента для работы с ультрахолодными нейтронами используются нейтроноводы разных типов. Они могут быть изготовлены из стекла, кварца, полированного металла (нержавеющая сталь, медь, сплавы алюминия). Их поверхность может быть покрыта никелем, сплавом никеля с молибденом, бериллием, окисью бериллия. Выбор конкретного типа нейтроновода определяется рядом условий: спектром нейтронов, который используется в эксперименте, необходимостью обеспечить электрическую изоляцию, необходимостью использовать нейтроноводы из немагнитных материалов при работе с поляризованными нейтронами.

В ряде случаев для изготовления нейтроноводов ультрахолодных нейтронов удобно использовать реплики. Метод реплик был разработан много лет назад в Техническом университете Мюнхена и применен в ИЛЛ для вывода нейтронов со скоростью 50 м/с от источника холодных нейтронов к турбине УХН для их замедления на лопатках турбины [4]. В нашем случае реплика это медная фольга, с одной стороны имеющая зеркальный слой сплава $^{58}\text{NiMo}$. В процессе изготовления репликовых нейтроноводов можно выделить пять технологических задач: подготовка стекла для напыления, напыление, электролитическое высаживание меди, снятие реплики

со стекла, собственно изготовление нейтроновода. Это деление достаточно условно, поскольку задачи взаимосвязаны.

Стекло, которое используется для изготовления реплик, должно быть столь же высокого качества, как и стекло, которое непосредственно используется для нейтроноводов. Мы используем float glass с дополнительным отбором по наличию точечных дефектов. Стандартный размер фольг, которые мы изготавливаем — 50 × 70 см. Этот размер определяется габаритами вакуумной камеры.

На рис. 1 показана вакуумная установка, которая используется для самых разных задач напыления в экспериментах с ультрахолодными нейтронами. В задаче по изготовлению реплик в этой установке напылялись слои $^{58}\text{NiMo}$ и меди.

До модернизации вакуумная камера откачивалась турбомолекулярным насосом с масляной смазкой подшипников. Чтобы исключить попадание в вакуумную камеру паров масла, мы заменили насосы. Сейчас мы исполь-



Рис. 1. Вакуумная установка для магнетронного напыления

зуюм сухой форвакуумный насос для предварительной откачки и криогенный насос в процессе напыления. Модернизация значительно упростила процесс подготовки перед напылением. Это связано с тем, что при обеспечении адгезии напыляемого слоя необходимо получить ее в оптимальном диапазоне. С одной стороны, надо обеспечить адгезию напыленного слоя, достаточную и равномерную по всей площади стекла. Это требуется для того, чтобы в процессе электролитического высаживания меди не происходило локального отслаивания слоя. Если же адгезия оказывается слишком хорошей, то при снятии фольги происходят частичное отрывание стекла и деформация фольги. До перехода на полностью безмасляную откачку перед началом напыления стекло очищалось ионной пушкой. Время и величина тока очистки были подобраны экспериментально. При полностью сухой откачке нет необходимости использовать ионную пушку, достаточно правильным образом помыть стекло перед загрузкой в вакуумную камеру. Это значительно упростило конструкцию установки и повысило надежность конечного результата.

Мы изготавливаем реплики с основным отражающим нейтроны слоем из сплава $^{58}\text{NiMo}$. Этот слой наносится магнетронным распылением на плоское стекло. Затем вторым магнетроном без вскрытия установки наносится слой меди. Используются круглые магнетроны с диаметрами мишеней 70 mm. Стекло располагается на вращающемся столе. Для равномерного покрытия всей площади магнетроны устанавливались поочередно в четыре положения по радиусу стола. Полная толщина покрытия $^{58}\text{NiMo}$ — 2500 Å, меди — 4000 Å. Для обеспечения прочности покрытия напыление обоих материалов производилось четырьмя слоями. При недостаточной прочности часть напыления в процессе снятия фольги со стекла может отделиться от общего слоя и остаться на стекле. Экспериментально было установлено, что разбивка на более тонкие слои увеличивает прочность их сцепления между собой.

После напыления стекло помещается в ванну с электролитом, и на поверхность напыленной меди высаживается дополнительный слой меди необходимой толщины. Использовался электролит для меднения стандартного состава на основе серной кислоты. Помимо этого, применялась блескообразующая добавка RV-T, которая обеспечивает гладкую незернистую поверхность высаживаемой меди.

Мы высаживали медь до толщины 70–200 μm в зависимости от конструкции нейтроновода, в котором планировалось использовать фольгу. Высаживание меди производилось за два равных промежутка времени. Для уменьшения неоднородности фольги по толщине стекло переворачивали на 180° относительно направления верх-низ. При высаживании фольг толщиной более 100 μm появлялись продольные неоднородности толщины в виде потеков в направлении верх-низ. К нижней кромке стекла мы прикрепили фторопластовый изолятор в виде узкой (15 mm) скобы. Это позволило устранить



Рис. 2. Стекло после высаживания на его поверхность слоя меди гальваническим способом.

„потеки“. На рис. 2 показано готовое стекло после высаживания меди.

По окончании процесса высаживания меди на поверхности могут быть точечные дефекты в виде мелких песчинок. Их происхождение пока нам не ясно, но они легко устраняются с поверхности мелкой наждачной бумагой. Перед снятием готовой фольги стекло равномерно прогревали феном до температуры 70–100°C. Это заметно облегчает процесс снятия. Толщина одной из реплик была нами обмеряна микрометром по всему ее периметру. Разброс толщины получился в диапазоне 145–160 μm, что вполне соответствует нашим задачам.

На рис. 3, *a, b* показана реплика, снятая со стекла, и на рис. 3, *c* в свернутом виде внутри трубы.

Реплики обеспечивают зеркальное отражение ультрахолодных нейтронов на том же высоком уровне, что и слои, напыленные на стекло. Используя реплики, можно изготовить нейтроноводы круглого или прямоугольного сечений или в виде конуса — в соответствии с задачей эксперимента. Нейтроноводы круглого сечения удобны для транспортировки нейтронов от источника к экспериментальной установке. Из труб нужного диаметра изготавливаются секции вакуумного кожуха, внутрь которых вкладываются реплики. На рис. 3, *c* представлены трубы различного диаметра с вложенными в них репликами.

Между собой трубы легко соединяются прямыми муфтами или муфтами с изломом на необходимый угол. Очень важно точно кроить перед укладкой реплики внутрь труб. При плотной укладке реплику без повреждений из кожуха не извлечь. Для более точного края с краев реплики, которые приходятся на концы трубы, отрезаются полоски шириной 2–3 см и подгоняются по длине для плотной укладки в трубу. По ним отмеряется ширина реплики, отрезается и укладывается в трубы с запасом 2–3 см на концах. Затем острым ножом излишек удаляется. В экспериментальных установках зачастую необходимы нейтроноводы прямоугольных сечений. Эти нейтроноводы также можно изготовить,



Рис. 3. Реплика *a, b* — после отделения от стекла и *c* — в свернутом виде внутри труб для нейтронов различного диаметра.

используя реплики. Из пластин алюминиевого сплава мы изготавливали разборные корпуса нейтронов. В разобранном виде детали нейтронов — это плоские пластины той или иной формы и толщины. Пластина укладывалась на плоскую металлическую плиту с электрическим подогревом, нагревалась до 70–90°С. На поверхность детали пистолетом распределяли термоклей. Фольга укладывалась на поверхность и прокатывалась жестким резиновым валиком. После остывания производилась чистовая обрезка и сверление. По этой технологии для установки по поиску ЭДМ нейтрона было изготовлено 12 секций нейтронов длиной

от 10 до 20 см. Качество приклейки проверялось откачкой в вакуумной камере. Вспучивания, отслоения, длительного гажения обнаружено не было.

Рабочая поверхность реплик обладает большой устойчивостью к процессам коррозии. Если, например, при неосторожном обращении на поверхности полированной нержавеющей стали, покрытой слоем сплава NiMo, оставить отпечатки пальцев, то уже через сутки смыть их не удастся. Рабочая поверхность реплики отмывается от подобных загрязнений даже спустя месяцы.

Качество нейтронов, изготовленных с применением реплик, было экспериментально проверено на пучке ультрахолодных нейтронов в институте Лауэ-Ланжевена (ИЛЛ). Основные нейтроны, которые вот уже более пятнадцати лет успешно используются различными экспериментальными группами на пучках УХН в ИЛЛ также изготовлены в нашем институте. Это нейтроны из нержавеющей труб, внутренняя поверхность которых после предварительной шлифовки отполирована анодно-механическим методом. Затем она покрыта сплавом $^{58}\text{NiMo}$ способом магнетронного напыления.

Для нейтронов разных типов был измерен коэффициент трансмиссии. Эксперимент проводился с применением времяпролетной методики. Компактный прерыватель с высоким временным разрешением был спроектирован для проведения времяпролетных измерений [5]. Для достижения высокого временного разрешения пучок УХН должен быть открытым на протяжении нескольких миллисекунд и оставаться в закрытом состоянии в течение нескольких секунд. Прерыватель состоит из двух титановых решеток с нанесенным на них слоем TiGd толщиной 0,8 мкм, который полностью поглощает нейтроны со скоростью до 50 м/с. Исходно решетки расположены так, что прорезы не совпадают и пучок УХН не проходит. Поворот механизма привода решеток на 180° приводит к тому, что одна из решеток быстро проходит через положение, когда отверстия решеток совпадают, при этом 30% от УХН в пучке проходят через устройство за 3 мс. Для получения спектра скоростей это движение повторяется с периодом в несколько секунд. Время открытого положения прерывателя измеряется с высокой точностью с помощью пары светодиод-фотодиод. Появление сигнала на диоде дает старт на проведение времяпролетных измерений.

В отличие от нейтронов, изготовленных из полированных нержавеющей труб, репликовые нейтроны имеют дополнительные потери в месте стыка фольги по всей длине трубы. Полированные анодно-механическим способом нейтроны не имеют продольного шва. Однако, их поверхности имеют большую шероховатость, чем поверхности репликовых нейтронов. Чтобы проверить качество репликовых нейтронов, мы выполнили экспериментальное сравнение характеристик по пропусканию УХН для различных нейтронов, изготовленных по различным технологиям: (1) репликовые нейтроны,

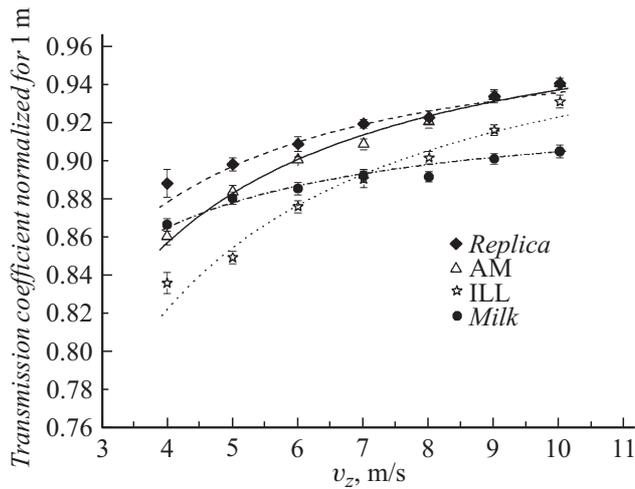


Рис. 4. Зависимость пропускания УХН от скорости для различных нейтронотодов. Кривая, проходящая через данные для случая нейтронотодов из молочных труб, служит для ориентира.

(2) полированные анодно-механическим методом нейтронотоды, (3) хонингованные и затем электрополированные нейтронотоды (мы назовем их „ИЛЛ“), и (4) — трубы из нержавеющей стали, которые используют в молочной промышленности. Нейтронотоды (1) и (2) имели внутренний диаметр 78 mm и внутреннее покрытие из сплава $^{58}\text{NiMo}$ толщиной $(3-5) \cdot 10^2$ nm с критической скоростью $v_c = 7.8$ m/s. Нейтронотоды (3) и (4) с поверхностью из нержавеющей стали без напыления имели внутренний диаметр 66 mm и $v_c = 6.2$ m/s.

Расхождение пучка, падающего на изучаемые нейтронотоды и сборки нейтронотодных секций различной длины, формировалось нейтронотодом длиной около 1 m из того же материала, что и исследуемый образец.

Спектрально-интегральные трансмиссионные потери на один метр были измерены со сборками длиной вплоть до нескольких метров. Мы получили потери на один метр $(5.5 \pm 0.3)\%$ для репликовых нейтронотодов, $(6.5 \pm 0.3)\%$ для нейтронотодов с анодно-механической полировкой, $(7.2 \pm 0.3)\%$ для „ИЛЛ“ нейтронотодов и $(8.6 \pm 0.3)\%$ для нейтронотодов из „молочных“ труб.

Рис. 4 показывает пропускание нейтронотодов как функцию скорости v_z вдоль нейтронотода, измеренную с помощью прерывателя, как описано выше. Для всех нейтронотодов, за исключением молочных труб, потери на пропускание оказываются пропорциональны частоте соударений со стенками нейтронотода или обратно пропорциональны v_z , т.е. зеркальным отражениям. Для подгонки данных можно использовать экспоненциальную функцию e^{-a-b/v_z} . Потери, зависящие от v_z и определяемые коэффициентом a , могут быть вызваны поперечным смещением отдельных секций нейтронотода друг относительно друга, а потери, не зависящие от v_z и определяемые коэффициентом b , вызваны главным образом шероховатостью поверхности нейтронотодов.

Коэффициент b оказался наименьшим для случая нейтронотодов на репликах благодаря почти идеальной поверхности. Тем не менее коэффициент a оказался наибольшим для этих нейтронотодов, что может быть обусловлено их более короткой длиной, из-за чего возникает больше стыков на метр длины нейтронотода и неизбежные щели.

Таким образом, в заключение можно сказать, что на основе репликовой технологии можно изготовить нейтронотоды высокого качества и разной формы для экспериментов с ультрахолодными нейтронами.

Исследование выполнено в ПИЯФ НИЦ „Курчатовский институт“ за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14–22–00105).

Список литературы

- [1] Серебров А.П. //УФН. 2015. Т. 185. № 11. С. 1179–1201.
- [2] Serebrov A.P., Kolomenskiy E.A., Pirozhkov A.N., Krasnoschekova I.A., Vassiljev A.V., Polushkin A.O., Lasakov M.S., Fomin A.K., Shoka I.V., Solovey V.A., Zhrebtsov O.M., Geltenbort P., Ivanov S.N., Zimmer O., Alexandrov E.B., Dmitriev S.P., Dovator N.A. // Письма в ЖЭТФ. 2014. Т. 99. № 1. С. 7–11
- [3] Serebrov A., Varlamov V., Kharitonov A., Fomin A., Pokotilovski Yu., Geltenbort P., Butterworth J., Krasnoschekova I., Lasakov M., Tal'daev R., Vassiljev A., Zhrebtsov O. // Phys. Lett. B. 2005. Vol. 605. N 1–2. P. 72–78
- [4] Steyerl A., Nagel H., Schreiber F.-X., Steinhäuser K.-A., Gähler R., Gläser W., Ageron P., Astruc J.M., Drexel W., Gervais G., Mampe W. // Phys. Lett. A. 1986. Vol. 116. N 7. P. 347–352.
- [5] Серебров А.П., Тальдаев Р.Р., Кунстман Г.К., Ефимов Н.А. // А.с. № 1053187. Время-пролетный спектрометр ультрахолодных нейтронов. 1983.