

УДК 53.082.79

ДВУХМОДОВЫЙ НЕЙТРОННЫЙ РЕФЛЕКТОМЕТР ДЛЯ КОМПАКТНОГО ИСТОЧНИКА НЕЙТРОНОВ DARIA

© 2023 г. В. Г. Сыромятников^{а, б, *}, Н. А. Григорьева^б, С. В. Григорьев^{а, б}

^аПетербургский институт ядерной физики, Национальный исследовательский центр
“Курчатовский институт”, Гатчина, 188300 Россия

^бСанкт-Петербургский государственный университет, Петродворец,
Санкт-Петербурге, 198504 Россия

*e-mail: syromyatnikov_vg@pnpi.nrcki.ru

Поступила в редакцию 25.12.2022 г.

После доработки 16.02.2023 г.

Принята к публикации 16.02.2023 г.

Представлена концепция двухмодового нейтронного рефлектометра с поляризатором, двумя спин-флипперами и анализатором поляризации после прохождения образца. На рефлектометре, предназначенном для компактного источника нейтронов DARIA, планируется измерять спектр отраженного “белого” пучка нейтронов времяпролетным методом при фиксированном угле скольжения с возможностью использования как поляризованных, так и неполяризованных нейтронов. Представлены основные геометрические и физические параметры нейтронного рефлектометра. При продолжительности нейтронного импульса $\tau = 100$ мкс и общей длине установки времяпролетной базы $L = 8$ м частота повторения импульсов может достигать величины $f = 165$ Гц для диапазона длин волн $\Delta\lambda = 3$ Å и разрешения $\Delta\lambda \cong 0.05$ Å. Использование элементов поляризационного анализа рефлектометра при поляризации пучка, превышающей 96%, и эффективности работы спин-флипперов, близкой к единице, дают возможность детально исследовать магнитные тонкопленочные наноструктуры.

Ключевые слова: компактный источник нейтронов DARIA, нейтронная рефлектометрия, поляризованные нейтроны, времяпролетный метод.

DOI: 10.31857/S102809602307018X, **EDN:** TEMOSE

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы нейтронная рефлектометрия становится все более распространенным неразрушающим методом исследования одиночных слоев, многослойных систем, поверхностей и межслойных границ при решении задач широкого спектра на стыке различных наук (химии поверхности полимеров, физики тонких пленок и многослойных структур и других наук) [1–3]. Рефлектометрия поляризованных нейтронов используется для исследований не только ядерной, но и магнитной структуры образца [4]. Сравнительная простота анализа данных о зеркальном отражении нейтронов способствует его широкому использованию для восстановления структуры и послойной магнитометрии на основе глубинных профилей плотностей длин нейтронного рассеяния [5].

Измерение коэффициента зеркального отражения излучения R как функции переданного импульса q дает информацию о зависимости плотности длины рассеяния нейтронов от глуби-

ны проникновения в образец [1]. Экспериментально $R(q)$ определяется из зависимости интенсивности отраженного пучка нейтронов либо от угла падения излучения на образец при фиксированной длине волны нейтрона (монокроматическая методика), либо от длины волны нейтрона при фиксированном угле падения излучения (времяпролетная методика). Обе методики имеют свои преимущества. Фиксированная геометрия установки образца во времяпролетной методике обеспечивает постоянную по площади засветку образца, а в случае с монокроматическим пучком засветка и положение образца изменяются в зависимости от угла скольжения. Метод “монокроматического пучка” имеет преимущества по сравнению с “времяпролетным”, если требуется измерить R в ограниченной области переданных импульсов (например, при измерении брэгговских пиков отражения от периодической многослойной структуры), поскольку имеется возможность оптимизировать время измерений при разных q . Во “времяпролетном” методе с “белым” пучком измеряют весь профиль $R(q)$. Заметные

преимущества времяпролетной методики перед монохроматической проявляются на импульсных источниках нейтронов, поскольку она использует весь поток нейтронов в импульсе, а монохроматическая методика обрезает поток до 99%. Такие потери в интенсивности приводят к тому, что монохроматические методики практически не используют на импульсных источниках нейтронов.

В 1977–1979 гг. в Петербургском (тогда Ленинградском) Институте ядерной физики (ПИЯФ) был разработан и создан первый в мире поляризационный нейтронный рефлектометр на стационарном источнике нейтронов – реакторе ВВР-М, работающий по времяпролетной методике [6, 7]. Рефлектометр неоднократно модернизировали для расширения его экспериментальных возможностей. В последней версии модернизации, завершённой в 2005 г., он получил название НР-4М [8]. НР-4М – это четырехмодовый нейтронный рефлектометр с двумя спин-флипперами и анализатором поляризации отраженного пучка. Он сочетал оба метода работы: “времяпролетный” метод и метод “монохроматического пучка”, причем в обоих методах возможна работа как с неполяризованными, так и с поляризованными нейтронными пучками. НР-4М завершил свою работу в 2015 г. в связи с окончательной остановкой реактора ВВР-М. В 2019–2022 гг. на базе основных узлов НР-4М создан рефлектометр ТНР для реактора ПИК (г. Гатчина) и проведены тестовые измерения. Рефлектометры НР-4М и ТНР разрабатывали для ядерных реакторов большой мощности, работающих на основе реакций деления ядра.

В настоящее время в мировом научном сообществе возник устойчивый интерес к разработке и созданию относительно недорогих источников нейтронов малой и средней мощности на базе импульсных ионных или электронных ускорителей. В таких источниках бериллиевая или литиевая мишень окружена замедлителем вылетевших из мишени нейтронов (вода или полимер, содержащий большое количество атомов водорода) и нейтронотводной системой, позволяющей транспортировать нейтронный поток от замедлителя до исследовательских инструментов. Использование компактных источников заметно повысит доступность нейтронных методик, и, по-видимому, сделает нейтронную рефлектометрию рутинным методом исследования слоистых структур.

Одним из таких источников является компактный источник нейтронов DARIA (Dedicated for Academic Research and Industrial Application) [9]. Для него было рассмотрено несколько вариантов реализации холодного замедлителя. Оптимизацию проводили для широкого диапазона длин волн 3–12 Å. Наиболее простым и надежным из рассмотренных вариантов оказался хо-

лодный замедлитель на основе мезитилена с поверхностью в виде прямоугольника с размерами 4 × 6 см. Интегральная плотность потока нейтронов на поверхности такого замедлителя в указанном диапазоне длин волн 8.3×10^{11} н/см²/с. Наблюдалось равномерное распределение спектральной плотности потока нейтронов по всей поверхности холодного замедлителя. В источнике DARIA импульсный поток протонов с энергией 13 МэВ, попадая на мишенную сборку, создает импульсный поток нейтронов. Этот поток после прохождения через холодный замедлитель характеризуется длительностью нейтронного импульса (вспышкой) τ и частотой следования нейтронных импульсов f . Средние значения τ и f составляют не менее 100 мкс и 100 Гц соответственно. Каждый нейтронный импульс (вспышка) имеет широкое спектральное распределение – порядка 2–12 Å. В то же время частота следования импульсов должна быть ограничена шириной используемого в установке спектра нейтронов из-за явления рецикличности, когда самые быстрые нейтроны импульса догоняют самые медленные нейтроны из предыдущего импульса, что приводит к искажению получаемых данных.

Соотношение для максимальной величины f , при которой еще нет рецикличности [10], имеет вид:

$$f = \frac{K}{L\Delta\lambda}, \quad (1)$$

где $K = 3958 \text{ Å} \cdot \text{м/с}$, L – времяпролетная база рефлектометра, $\Delta\lambda$ – ширина используемого спектра в установке. Чем шире спектр, тем меньше должна быть частота следования нейтронных импульсов и, следовательно, меньше светосила установки. Так, для узкого нейтронного спектра шириной 3 Å частота следования импульсов, а, соответственно, и светосила установки будут в шесть раз выше, чем для спектра шириной 9 Å. Поэтому имеет смысл работать с узкими спектрами, особенно когда для решения физической задачи не требуется использование широкого спектра, например, для исследования поведения брэгговских пиков наноструктур в зависимости от напряженности магнитного поля и температуры.

В работе описывается концепция двухмодового нейтронного рефлектометра для компактного источника нейтронов DARIA. В частности, в концепции использованы основные узлы и наработки времяпролетной методики, эксплуатируемой на базе четырехмодового нейтронного рефлектометра НР-4М [8].

ОБЩАЯ СХЕМА УСТАНОВКИ

Рефлектометр для компактного источника нейтронов DARIA предназначен для измерения зависимости интенсивности отраженного (“бе-

лого”) пучка нейтронов от длины волны время-пролетным методом при фиксированном угле скольжения с возможностью использования как поляризованных, так и неполяризованных нейтронов. Здесь и далее под “белым” пучком будем понимать пучок, имеющий широкое спектральное распределение тепловых и холодных нейтронов. Схема нейтронного рефлектометра представлена на рис. 1. Выводящий коллиматор 1, расположенный внутри мишенной сборки компактного источника нейтронов, задает первичную коллимацию пучка ~ 1 мрад в горизонтальной плоскости. Лазерный модуль 2 используют для предварительной юстировки элементов установки перед нейтронными измерениями. В качестве монитора 3 предусмотрен низкоэффективный счетчик нейтронов. Немагнитное суперзеркало NiMo/Ti ($m = 2$) 4 отклоняет пучок нейтронов от оси выводящего коллиматора с целью отделения пучка тепловых и холодных нейтронов от пучка γ -квантов и быстрых нейтронов, поступающих из мишенной сборки источника. Здесь и далее при упоминании суперзеркал используется параметр нейтронного суперзеркала m , равный отношению критического угла данного суперзеркала к критическому углу нейтронного зеркала с покрытием из природного никеля. Уход из прямой видимости мишени значительно снижает фон на детекторе. Размеры отклоняющего зеркала составляют $5 \times 80 \times 210$ мм, а угол отклонения пучка нейтронов от оси выводящего коллиматора равен 20 угл. мин. Фоновый коллиматор 5 служит для подавления остаточного фона γ -квантов и быстрых нейтронов и располагается вплотную к отклоняющему суперзеркалу. Стенки коллиматора изготовлены из стали и борированного полиэтилена, ширина канала коллиматора составляет 1.0 мм, высота 30 мм и длина 400 мм.

Один из основных узлов рефлектометра – двухдисковый прерыватель пучка 6. Как отмечалось выше, оптимальные для проведения эксперимента на установке длительность τ и частота нейтронных импульсов f задаются протонным ускорителем компактного источника нейтронов. Величина f определяется из соотношения (1) с учетом планируемого для использования в эксперименте спектра шириной $\Delta\lambda$, который вырезается с помощью двухдискового прерывателя [10, 11] из нейтронных импульсов, имеющих широкое спектральное распределение, превышающее $\Delta\lambda$. При работе с узкими нейтронными спектрами, а, соответственно, с высокими значениями f , время измерения образца в рефлектометре можно значительно уменьшить, что повысит эффективность его использования. Кроме того, прерыватель корректирует форму и длительность нейтронного импульса τ , а также используется для привязки точки отсчета к времяпролетной базе.

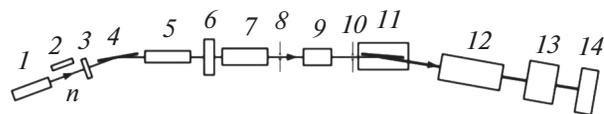


Рис. 1. Схема нейтронного рефлектометра для компактного источника DARIA: 1 – выводящий коллиматор; 2 – лазерный модуль; 3 – монитор; 4 – немагнитное суперзеркало NiMo/Ti ($m = 2$); 5 – фоновый коллиматор; 6 – двухдисковый прерыватель пучка; 7 – поляризатор пучка; 8, 10 – коллимирующие диафрагмы; 9, 12 – радиочастотные адиабатические спин-флипперы; 11 – узел образца; 13 – широкоапертурный веерный анализатор; 14 – двухкоординатный позиционно-чувствительный детектор.

Поляризатор пучка 7 – двойное магнитное суперзеркало, помещенное в постоянное магнитное поле, – служит для поляризации “белого” пучка нейтронов. При работе с немагнитными образцами поляризатор выводится из пучка. Коллимирующие диафрагмы 8 и 10 формируют угловую расходимость пучка, падающего на образец. Для реализации схемы нейтронного поляризационного анализа [12] в состав установки помимо поляризатора 7 входят два радиочастотных адиабатических спин-флиппера 9, 12 и анализатор 13. Использование спин-флиппера позволяет изменять направление поляризации пучка нейтронов из положения “вдоль поля” в положение “против поля” во всем диапазоне длин волн, используемом рефлектометром. Узел образца 11 состоит из программно управляемого юстировочного столика, на который можно устанавливать электромагнит и/или криостат. Электромагнит создает в плоскости образца однородное вертикальное магнитное поле напряженностью H . В рефлектометре предусмотрена система ведущего магнитного поля. Она расположена по ходу пучка от магнита поляризатора до магнита анализатора. На рис. 1 эта система не показана. В качестве анализатора 13 предполагается использовать широкоапертурный веерный анализатор поляризации [13] с размерами входного окна 180×250 мм ($B \times \Pi$). Анализатор помещен в зазор магнитной системы с напряженностью поля на оптической оси канала $H \sim 500$ Э. Стенки каналов анализатора имеют поляризующее суперзеркальное покрытие из FeCoV/TiZr. Все нейтронные поляризующие суперзеркала заранее аттестованы с использованием техники рефлектометрии поляризованных нейтронов. На рис. 2 представлен результат аттестации одного такого нейтронного поляризующего суперзеркала ($m = 2$). Были измерены коэффициенты отражения для спиновых компонент R^+ и R^- пучка нейтронов как функции переданного импульса q , вычислена и построена зависимость поляризующей эффективности P от переданного импульса [14]. В работе с немагнитными образцами анализатор выводится из пучка.

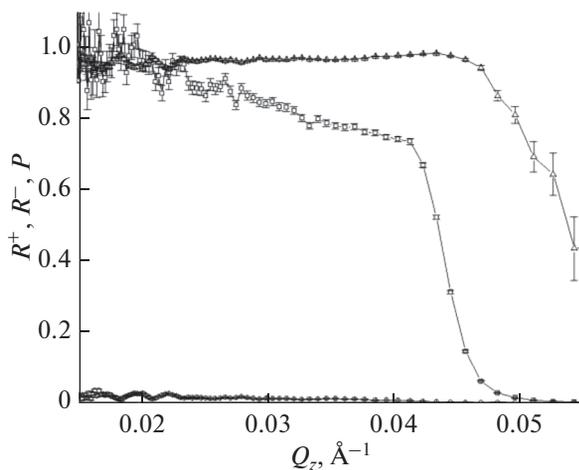


Рис. 2. Зависимости поляризующей эффективности P (треугольники), коэффициентов отражения для R^+ (квадратики) и R^- (кружки) спиновых компонент пучка как функции переданного импульса q для нейтронного поляризующего суперзеркала FeCoV/TiZr ($m = 2$).

Вплотную к выходу анализатора установлен детектор 14. В качестве детектора могут быть использованы одно- или двухкоординатные газовые позиционно-чувствительные детекторы [15], в которых конвертором нейтронов служат гелий или смесь гелия с многоатомным газом типа пропана, изобутана, метана, тетрафторметана, тетрафторэтана, углекислого газа либо смесь гелия с благородными газами, такими как Хе, Кг, Аг.

ОПИСАНИЕ РАБОТЫ РЕФЛЕКТОМЕТРА В ДВУХ МОДАХ

Для исследования немагнитных и магнитных образцов рефлектометр работает в двух модах соответственно: неполяризованной (мода I) и поляризованной (мода II).

В моде I “белый” неполяризованный пучок, сформированный отклоняющим немагнитным суперзеркалом из NiMo/Ti 4 (рис. 1), проходит через фоновый коллиматор 5 и прерыватель 6, две коллимационные диафрагмы 8 и 10 и попадает на плоскость образца 11. Отраженный от немагнитного образца пучок регистрируется позиционно-чувствительным детектором 14. Зависимость относительной интенсивности падающих на образец нейтронов от длины волны в моде I близка спектру нейтронов замедлителя мишенной сборки и представлена на рис. 3а. Видно, что интенсивность падает почти на три порядка с ростом длины волны от 1 до 6 Å. Профиль пучка, проходящего через систему коллиматоров и падающего на образец в моде I, представлен на рис. 3б. Его измеряют как интенсивность нейтронов в детекторе в зависимости от угла рассеяния ω .

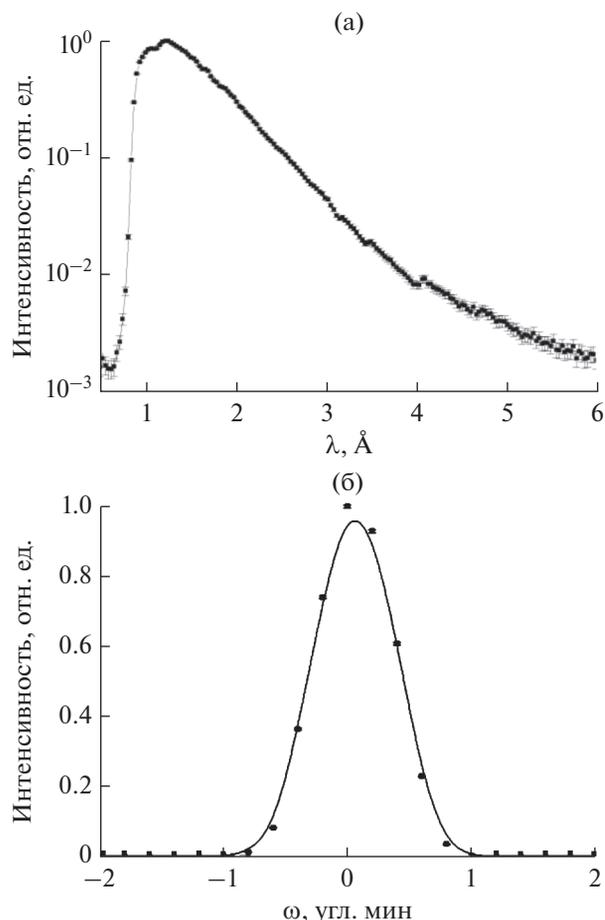


Рис. 3. “Белый” неполяризованный пучок (мода I): а – спектр; б – профиль.

В моде II пучок неполяризованных нейтронов, отраженный от отклоняющего немагнитного суперзеркала 4 (рис. 1), прошедший через фоновый коллиматор 5 и прерыватель 6, далее формируется поляризатором 7. На рис. 4 представлена схема поляризатора пучка рефлектометра. Поляризатор состоит из двух нейтронных поляризующих суперзеркал из FeCoV/TiZr ($m = 2$) с поглощающим подслоем TiZrGd [14], установленных вертикально в зазор постоянного магнита с напряженностью поля $H \sim 500$ Э. Вектор напряженности магнитного поля лежит в плоскости суперзеркал. Суперзеркала параллельны и обращены друг к другу отражающими поверхностями. Пучок нейтронов со спинами, направленными вдоль вектора намагниченности суперзеркал, отражается от первого суперзеркала под углом θ_{SM} , падает на второе суперзеркало под тем же углом θ_{SM} , отражается и выходит из поляризатора. Угол $\theta_{SM} = 10$ угл. мин обеспечивает прохождение через такой двойной поляризатор всего спектра нейтронов, отраженного от отклоняющего суперзеркала из NiMo/Ti. На рис. 4 пунктиром показаны нейтроны со спи-

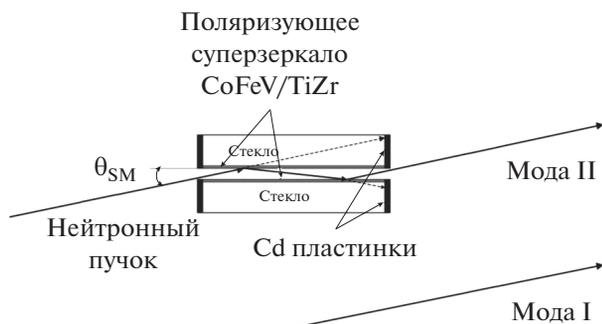


Рис. 4. Схема поляризатора пучка рефлектометра.

новой компонентой, направленной противоположно намагниченности суперзеркал. Эти нейтроны не испытывают отражения, проходят вглубь стеклянной подложки, достигают кадмиевых пластинок, укрепленных на торцах зеркал, и поглощаются в них. Вышедший пучок после отражения от двух зеркал (рис. 4) параллелен падающему пучку. Поляризатор пучка с магнитом устанавливают на программно управляемом юстировочном столе. Настройка поляризатора происходит путем вращения стола, а переход от одной моды к другой – путем перемещения стола поперек пучка. При таком перемещении не требуется заново настраивать узлы рефлектометра.

“Белый” поляризованный пучок, вышедший из поляризатора 7 (рис. 1), проходит через две коллимационные диафрагмы 8 и 10, спин-флиппер 9, расположенный между ними, и попадает на плоскость образца 11. Отраженный от магнитного образца пучок проходит через второй спин-флиппер 12, всерный анализатор 13 и регистрируется позиционно-чувствительным детектором 14. Такая схема позволяет проводить поляризационный анализ отраженного пучка нейтронов и извлечь информацию о магнитных свойствах образца.

Спектры и профиль пучка нейтронов практически совпадают в модах I и II. Угловая ширина пучка (ширина на полувысоте), падающего на образец, равна 0.8 угл. мин, но по абсолютной величине интенсивность “поляризованной” моды II в три–четыре раза меньше интенсивности в “неполяризованной” моде I.

Для получения кривой спектральной поляризующей эффективности двойного поляризатора в моде II в узле образца устанавливают вторую пару поляризующих суперзеркал FeCo/TiZr на такой же (как и в поляризаторе) угол $\theta_{SM} = 10$ угл. мин в магнитном поле $H = 470$ Э. Спектральную зависимость поляризующей эффективности $P_p(\lambda)$ определяли из следующего соотношения:

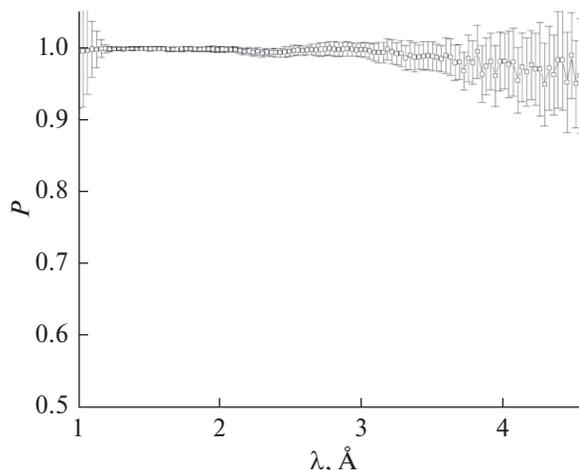


Рис. 5. Спектральная зависимость поляризующей эффективности P для двойного суперзеркального (CoFeV/TiZr, $m = 2$) поляризатора (мода II).

$$P(\lambda) = P_p(\lambda)P_a(\lambda) = \frac{r(\lambda) - 1}{1 - r(\lambda)[1 - 2f_1(\lambda)]}, \quad (2)$$

где $P(\lambda)$ – поляризация пучка, прошедшего через двойной поляризатор и двойной анализатор, $r(\lambda) = \frac{I_{off}(\lambda)}{I_{on}(\lambda)}$ – флипп-отношение, I_{off} – интенсивность пучка нейтронов при выключенном первом флиппере, I_{on} – интенсивность пучка нейтронов при включенном первом флиппере, $f_1(\lambda)$ – спектральная зависимость эффективности первого флиппера. Зависимость $P(\lambda)$ была получена в предположении, что $P_p(\lambda) \cong P_a(\lambda)$ и эффективность $f_1(\lambda)$ близка к единице во всем диапазоне длин волн. На рис. 5 представлена спектральная поляризующая эффективность P для системы из двух двойных поляризаторов. Из рисунка следует, что поляризующая эффективность очень высока и почти во всем диапазоне длин волн $\lambda = 0.9\text{--}4.2$ Å превышает уровень 0.95 [8].

В режиме аттестации рефлектометра спектральные зависимости интенсивности нейтронного пучка измеряли с использованием всех элементов поляризационного тракта рефлектометра. Пучок после поляризатора проходит через оба флиппера (образец в данном эксперименте отсутствует), отражается от зеркала-анализатора и детектируется. Спектральные зависимости интенсивности нейтронного пучка, отраженного от зеркала-анализатора для различных состояний спин-флипперов, представлены на рис. 6.

Эффективности первого и второго флипперов были определены по известным формулам:

$$f_1 = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{I_{--} - I_{+-}}{I_{++} - I_{+-}} \right), \quad (3)$$

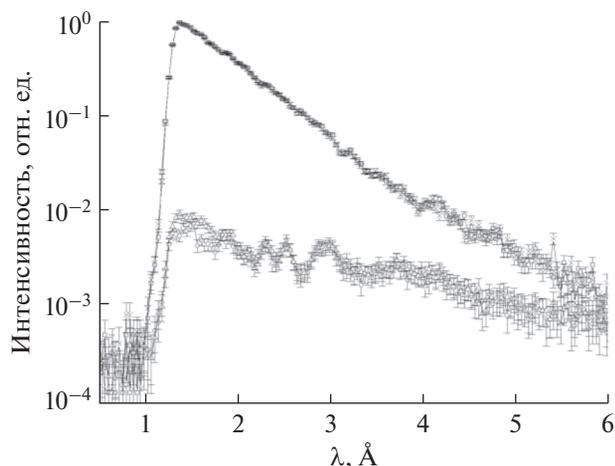


Рис. 6. Спектральные зависимости интенсивностей I_{++} (открытые квадратики), I_{--} (закрытые квадратики), I_{-+} (открытые кружки), I_{+-} (закрытые кружки) нейтронного пучка, отраженного от зеркала анализатора. Символы “+” и “-” обозначают включенное и выключенное состояния флиппера соответственно. Первый символ относится к первому флипперу, второй символ – ко второму.

$$f_2 = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{I_{--} - I_{+-}}{I_{++} - I_{-+}} \right). \quad (4)$$

Эти зависимости представлены на рис. 7. Из рисунка следует, что эффективность переворота спинов нейтронов для обоих флипперов высока и близка к единице во всем рассматриваемом диапазоне длин волн. В области коротких длин волн $\lambda = 0.9\text{--}1.5 \text{ \AA}$ эффективность первого флиппера немного выше, чем второго. Средневзвешенная по спектру эффективность переворота спина нейтрона для первого флиппера равна $f_1 = 0.998 \pm 0.016$, а для второго $f_2 = 0.996 \pm 0.016$.

В рефлектометре для компактного источника DARIA будут использованы два радиочастотных адиабатических флиппера для переворота спина нейтрона, так как они хорошо себя показали при работе с пучками нейтронов “белого” спектра [12].

РАЗРЕШЕНИЕ РЕФЛЕКТОМЕТРА

Разрешение рефлектометра по переданному импульсу $\Delta q/q$ в общем виде определяется рядом параметров: длиной пролетной базы L , точностью измерения длины базы ΔL , длительностью нейтронного импульса τ , временем пролета нейтронов от прерывателя пучка до детектора T , расходимостью пучка $\Delta\theta$, углом скольжения θ :

$$\Delta q/q = \left([\tau/T]^2 + [\Delta L/L]^2 + [\Delta\theta/\theta]^2 \right)^{1/2}. \quad (5)$$

Длительность импульса τ , сформированного в мишенной сборке, дополнительно корректирует-

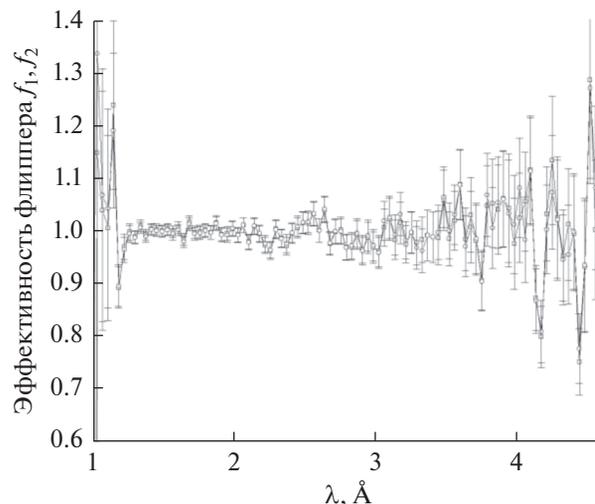


Рис. 7. Спектральные зависимости эффективности первого (квадратики) и второго (кружки) спин-флипперов для “поляризационной” моды II.

ся скоростью вращения диска прерывателя и суммой ширины пучка и ширины щели диска прерывателя.

Абсолютное разрешение по углу $\Delta\theta$ определяется расходимостью падающего пучка и кривизной образца. Неточность в определении угла скольжения θ после определения центра профиля отраженного пучка много меньше $\Delta\theta$, поэтому ею можно пренебречь. В большинстве случаев определяющий вклад в $\Delta\theta$ вносит именно расходимость падающего на образец пучка, задаваемая коллимационными щелями δ и l_0 (рис. 1).

В соотношении (5) вкладом $\Delta L/L$ можно пренебречь и, получая после преобразований равенство $\tau/T = \Delta\lambda/\lambda$, представим это соотношение в виде:

$$\Delta q/q = \left([\Delta\lambda/\lambda]^2 + [\Delta\theta/\theta]^2 \right)^{1/2}, \quad (6)$$

где $\Delta\lambda$ – точность определения длины волны. Параметр $\Delta\lambda$ находим из соотношения:

$$\Delta\lambda = \frac{K\tau}{L}, \quad (7)$$

где $K = 3958 \text{ \AA м/с}$.

Величину $\Delta\lambda$ можно экспериментально определить по размытию отсечки на длине волны 3.96 \AA в спектре нейтронного пучка, пропущенного через бериллиевый фильтр. Ее можно оценить из параметра установки $\Delta\lambda \approx 0.05 \text{ \AA}$ в (7) (для $\tau = 100 \text{ мкс}$ и $L = 8 \text{ м}$). Зависимость относительно разрешения $\Delta q/q$ от λ показана на рис. 8 для трех углов скольжения (5, 15 и 40 угл. мин) при расходимости первичного пучка $\Delta\theta = 0.8 \text{ угл. мин}$, $\tau = 100 \text{ мкс}$ и $L = 8 \text{ м}$. Из рисунка видно, что при малом угле скольжения основной вклад в разре-

шение вносит расходимость пучка – второй член подкоренного выражения в (6), а при больших углах скольжения заметным становится спектральный вклад – первый член подкоренного выражения в (6), особенно в диапазоне малых длин волн.

Коэффициент отражения $R(q)$ определяется из спектров отраженного I_R и падающего I_0 пучков:

$$R(q) = [I_R(q) - I_{BgR}]t/[I_0(q) - I_{Bg}]t_R, \quad (8)$$

где интенсивность фона и времена набора спектра отраженных и падающих нейтронов обозначены как I_{BgR} , t_R и I_{Bg} , t соответственно. Планируемые основные параметры нейтронного рефлектометра для компактного источника нейтронов DARIA представлены в табл. 1.

АВТОМАТИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ РЕФЛЕКТОМЕТРОМ

Для управления элементами установки нейтронного рефлектометра для компактного источника нейтронов DARIA планируется использовать юстировочные столы с двумя видами движения: поворотом и перемещением. Столы следует оснастить 12-разрядными 16-оборотными датчиками “угол–код”, которые преобразуют угол поворота вала датчика в 12-разрядный параллельный код Грея для осуществления обратной связи, что значительно повышает точность позиционирования и наилучшим образом решает задачу ав-

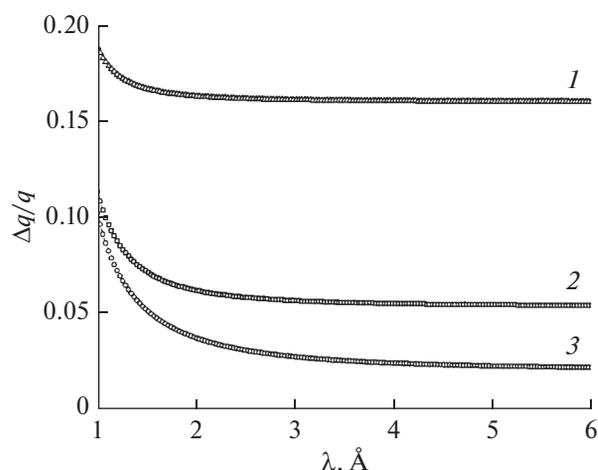


Рис. 8. Зависимость относительного разрешения $\Delta q/q$ от длины волны λ при расходимости первичного пучка $\Delta\theta = 0.8$ угл. мин, длительности нейтронного импульса $\tau = 100$ мкс и длины пролетной базы $L = 8$ м для углов скольжения: 5 (1); 15 (2); 40 угл. мин (3).

томатизации прецизионных движений юстировочных столов рефлектометра. Эти столы должны обеспечивать прецизионный поворот столешницы в диапазоне нескольких градусов с минимальным шагом не более 0.5 угл. с, а также ее перемещение в направлении, перпендикулярном оси пучка, в

Таблица 1. Основные параметры нейтронного рефлектометра для компактного источника нейтронов DARIA

Режимы работы установки	Времяпролетный
Диапазон рабочих длин волн, Å	1–10
Плоскость рассеяния	Горизонтальная
Ведущее поле	Вертикальное
Сечение пучка нейтронов в позиции образца, мм	(0.1 × 10)–(2.0 × 50)
Максимальный доступный диапазон по переданному импульсу q , Å ⁻¹	0.001–0.5
Относительное разрешение по переданному импульсу $\Delta q/q$, %	2–10%
Поляризующая эффективность и анализирующая способность суперзеркального поляризатора и веерного анализатора в рабочем диапазоне длин волн	Не менее 0.96
Сечение входного окна веерного анализатора В × Ш, мм	180 × 250
Эффективность переворота спина нейтронов для радиочастотных адиабатических спин-флипперов	Не менее 0.98
Максимальное магнитное поле в зазоре электромагнита на образце, кЭ	20
Диапазон рабочих температур образца, К	1.4–300
Монитор	Счетчик ³ He
Детектор	Двухкоординатный ³ He ПЧД с размерами чувствительной области 250 × 250 мм

Примечание. ПЧД – позиционно-чувствительный детектор.

диапазоне ~ 100 мм с минимальным шагом перемещения не более 10 мкм.

Для управления элементами рефлектометра, сбора и обработки результатов следует разработать программу с модульной организацией. Прототип уже существует – это программа UNICOM, выполненная в среде WINDOWS [8]. Модульная организация программы заключается в обеспечении работы с относительно независимыми частями программы, каждая из которых оформляется в виде команды. Таким образом, команду сопоставляют с одной или рядом операций с соответствующим программным и, при необходимости, электронным обеспечением. У каждой команды есть имя, и она может иметь уточняющие аргументы. Выполнению команды соответствует выполнение логически завершенного действия. Для того чтобы команды были совместимы, их надо согласовать по параметрам. Программа обеспечивает ввод команд, их редактирование, прохождение в заданной последовательности и включает в себя ряд базисных команд общего характера и ряд специальных команд, ориентированных на определенный физический прибор и его электронику.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлена концепция времяпролетного рефлектометра тепловых и холодных нейтронов для импульсного компактного источника нейтронов DARIA. Рефлектометр с двумя флипперами и анализатором поляризации после прохождения образца позволяет проводить эксперименты (в зависимости от решаемой физической задачи) в одной из двух мод: мода I – времяпролетный режим с использованием “белого” неполяризованного пучка; мода II – времяпролетный режим с использованием “белого” поляризованного пучка. Использование двухдискового прерывателя позволяет полнее раскрыть возможности компактного источника с целью оптимизации проведения текущего эксперимента на рефлектометре.

Представлены также основные геометрические и физические параметры нейтронного рефлектометра, планируемого для компактного источника нейтронов DARIA. При длительности нейтронного импульса $\tau = 100$ мкс и общей длине установки времяпролетной базы $L = 8$ м частота повторения импульсов может достигать величины $f = 165$ Гц (коэффициент заполнения 1.66%) для диапазона длин волн $\Delta\lambda = 3$ Å и разрешения $\Delta\lambda \cong 0.05$ Å. Если же диапазон длин волн выбран шире $\Delta\lambda = 6$ Å, то при тех же параметрах частота должна быть не больше чем $f = 82$ Гц (коэффициент заполнения 0.83%). Рабочий диапазон длин волн, в котором параметром оптимизации является плотность потока нейтронов на образце, и

определяет окончательный выбор частоты f и длительности импульса τ нейтронов.

Использование элементов поляризационного анализа рефлектометра позволяет получить модули четырех элементов матрицы отражения нейтронов. Поляризация пучка превышает 96%, эффективность работы спин-флипперов приближается к единице. Такие параметры поляризующей техники дают возможность детально исследовать магнитные тонкопленочные наноструктуры. Предложена концепция автоматизации управления рефлектометром.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках договора № 075-15-2022-830 (продление договора № 075-15-2021-1358 от 12 октября 2021 г.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Боднарчук В.И., Булкин А.П., Кравцов Е.А., Пleshанов Н.К., Сыромятников В.Г., Ульянов В.А. // Кристаллография. 2022. Т. 67. № 1. С. 57. <https://doi.org/10.31857/S0023476122010040>
2. Lauter H.-J., Lauter V., Toperverg B.P. // Polymer Sci. A. 2012. V. 2. P. 411. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53349-4.00033-9>
3. Fitzsimmons M.R., Schuller Ivan K. // J. Magn. Magn. Mater. 2014. V. 350. P. 199. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2013.09.028>
4. Никитенко Ю.В., Сыромятников В.Г. Рефлектометрия поляризованных нейтронов. М.: Физматлит, 2013. С. 224.
5. Zabel H., Theis-Bröhl K., Toperverg B.P. // The Handbook of Magnetism and Advanced Magnetic Materials, V. 3: Novel Techniques / Ed. Kronmüller H., Parkin S.P.S. New York: Wiley, 2007. P. 1237.
6. Шебетов А.Ф., Кудряшов В.А., Харченко В.П., Агамаян М.М. // Журн. эксперим. и теор. физики. 1978. Т. 74. № 3. С. 862. http://www.jetp.ras.ru/cgi-bin/dn/e_047_03_0450.pdf
7. Лукасов А.Г., Дериглазов В.В., Кезерашвили В.Я., Кудряшов В.А., Крутов Г.А., Песков Б.Г., Сыромятников В.Г., Трунов В.А., Харченко В.П., Шебетов А.Ф. // Журн. эксперим. и теор. физики. 1979. Т. 77. № 5. С. 1720.
8. Syromyatnikov V.G., Pleshanov N.K., Pusenkov V.M., Schebetov A.F., Ulyanov V.A., Kasman Ya.A., Khakhalin S.I., Kolkhidashvili M.R., Slyusar V.N., Sumbatyan A.A. Four-Modes Neutron Reflectometer NR-4M. Preprint № 2619. Gatchina: PNPI, 2005. P. 47.
9. Pavlov K.A., Konik P.I., Kovalenko N.A., Kulevoy T.V., Serebrennikov D.A., Subbotina V.V., Pavlova A.E., Gri-gorev S.V. // Crystallogr. Rep. 2022. V. 67. № 1. P. 3. <https://doi.org/10.1134/S1063774522010096>
10. Syromyatnikov V.G. // J. Phys. Soc. Jpn.: Conf. Ser. 2018. V. 22. P. 011005. <https://doi.org/10.7566/JPSCP.22.011005>

11. Патент № 2680713 (РФ). Прерыватель нейтронного пучка / Сыромятников В.Г. // Приоритет изобретения 30.03.2018. Зарегистрирован в Государственном реестре изобретений РФ 26.02.2019.
12. Grigoriev S.V., Runov V.V., Okorokov A.I. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 1997. V. 384. Iss. 2–3. P. 451.
[https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(96\)00919-9](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(96)00919-9)
13. Syromyatnikov V.G., Ulyanov V.A., Lauter V., Pusenkov V.M., Ambaye H., Goyette R., Hoffmann M., Bulkin A.P., Kuznetsov I.N., Medvedev E.N. // J. Phys.: Conf. Ser. 2014. V. 528. P. 012021.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/528/1/012021>
14. Schebetov A.F., Pleshanov N.K., Syromyatnikov V.G., Pusenkov V.M., Peskov B.G., Shmelev G.E., Soroko Z.N., Ul'yanov V.A. // J. Phys. Soc. Jpn. 1996. V. 65. (Suppl. A). P. 195. http://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:29007485.
15. Кауцк А.П., Левицкая О.В. // Журн. тех. физики. 2020. Т. 90. № 4. С. 519.
<https://doi.org/10.21883/JTF.2020.04.49074.84-19>

A Two-Mode Time-of-Flight Neutron Reflectometer for a Compact Neutron Source DARIA

V. G. Syromyatnikov^{1, 2, *}, N. A. Grigoryeva², S. V. Grigoriev^{1, 2}

¹*Petersburg Nuclear Physics Institute, National Research Center “Kurchatov Institute”, Gatchina, 188300 Russia*

²*St. Petersburg State University, Petrodvorets, St. Petersburg, 198504 Russia*

*e-mail: syromyatnikov_vg@pnpi.nrcki.ru

The concept of a two-mode neutron reflectometer with a polarizer, two spin-flippers and an analyzer of polarization after passing through the sample is presented. A reflectometer designed for a compact neutron source DARIA is planned to measure the spectrum of a reflected “white” neutron beam using the time-of-flight method at a fixed glancing angle with the possibility of using both polarized and non-polarized neutrons. The main geometric and physical parameters of the neutron reflectometer are presented. With a neutron pulse duration $\tau = 100 \mu\text{s}$ and a total length of the time-of-flight base $L = 8 \text{ m}$, the pulse repetition rate can reach $f = 165 \text{ Hz}$ for the wavelength range $\Delta\lambda = 3 \text{ \AA}$ and resolution $\Delta\lambda \cong 0.05 \text{ \AA}$. The use of polarization analysis elements of a reflectometer at a beam polarization exceeding 96% and an efficiency of spin flippers close to unity makes it possible to study magnetic thin-film nanostructures in detail.

Keywords: compact neutron source DARIA, neutron reflectometry, polarized neutrons, time-of-flight method.