

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

Н 749

P3-87-578

М.И.Новопольцев*, Ю.Н.Покотиловский,
И.Г.Шелкова

ВРЕМЯПРОЛЕТНАЯ СПЕКТРОМЕТРИЯ
УЛЬТРАХОЛОДНЫХ НЕЙТРОНОВ
НА ОСНОВЕ ТОНКОПЛЕНЧОГО
ФЕРРОМАГНИТНОГО ПРЕРЫВАТЕЛЯ

Направлено в журнал "Nuclear Instruments and Methods"

* Мордовский государственный университет, Саранск

1987

Малая энергия ($\sim 10^{-7}$ эВ) ультрахолодных нейтронов (УХН) позволяет для модуляции потока использовать быстро переключаемое магнитное поле.

Принцип действия и первая экспериментальная проверка такого затвора для УХН описаны в работах /1-3/.

Кратко принцип заключается в следующем. Энергия взаимодействия медленных нейтронов с веществом определяется выражением

$$U = U_{\text{яд}} \pm U_{\text{магн.}} = \frac{\hbar^2}{2m} 4\pi \sum_L N_L b_L \pm \mu B, \quad (1)$$

где b_L - когерентная длина рассеяния нейтронов на связанных ядрах среды, N_L - число ядер в единице объема, m - масса нейтрона,

μ - магнитный момент нейтрона, B - магнитная индукция; знаки + и - соответствуют параллельной и антипараллельной ориентациям спина нейтрона и направления магнитной индукции.

Если чередующиеся слои ферромагнетика имеют существенно различающиеся коэрцитивные силы, то, соответственным образом изменяя внешнее магнитное поле, можно слои намагнитить через один в противоположных направлениях. В этом случае система слоев будет отражать нейтроны обеих поляризаций в диапазоне энергий $U_{\text{рад.}} = [U_{\text{яд.}} - U_{\text{магн.}} + U_{\text{яд.}} + U_{\text{магн.}}]$ при условии отсутствия адиабатического поворота спина нейтрона в промежутках между слоями. При намагничивании всех ферромагнитных слоев в одном направлении затвор открывается, так что сквозь него могут проходить нейтроны со спином против поля с энергией выше $U_{\text{яд.}} - U_{\text{магн.}}$.

В /3/ описана работа таких затворов, состоящих из тонких, напыленных одна на другую ферромагнитных пленок. Пленки пермаллой (50% Ni + 50% Fe) и железа напылялись термически последовательно (без разгерметизации) на поверхность полированных кремниевых пластин толщиной 0,38 мм, размером 2x2 см. В процессе напыления поддерживались следующие условия: вакуум 10^{-5} Торр, температура подложки 200-250 С, магнитное поле в плоскости пленок ~ 50 Э - для улучшения магнитных свойств путем создания оси легкого намагничивания (одноосная анизотропия). Толщина ферромагнитных слоев 1000-2000 Å, при меньшей толщине значительно возрастала коэрцитивная сила. Между ферромагнитными слоями напылялись переходные слои

кремния толщиной ~ 2000 Å, в противном случае запирающее действие затвора не наблюдалось /3/.

Магнитные свойства полученных многослойных пленок исследовались с помощью вибрационного магнитометра.

Для многослойных пленок естественного состава нижняя граница пропускаемого спектра нейтронов $U_{\text{яд.}} - U_{\text{магн.}}$ составляла ~ 140 нэВ. Столь высокая в диапазоне УХН величина существенно уменьшала пропускание затвора в открытом состоянии. Например, описанный в /3/ 4-слойный ферромагнитный затвор в открытом состоянии ослаблял падающий поток (спектр падающих нейтронов заключался в диапазоне энергий 55+190 нэВ) в ~ 40 раз.

В настоящей работе описаны результаты исследования затворов, изготовленных из специальных изотопных смесей, понижающих граничную энергию затвора в открытом состоянии. Использовались следующие составы ферромагнитных слоев:

"магнитомягкий" слой пермаллой ${}^{54}\text{Fe}$ 50% + ${}^{60}\text{Ni}$ 50%,
 "магнитожесткий" слой ${}^{54}\text{Fe}$ 40% + ${}^{57}\text{Fe}$ 60%.

Для такого состава $U_{\text{яд.}} - U_{\text{магн.}}$ для каждого из слоев равен ~ 55 нэВ, что соответствует граничной энергии кремниевой подложки и разделяющих слоев.

На рис. I показаны кривые пропускания для 2- и 4-слойного затвора для УХН в интервале энергий 55+190 нэВ (точная форма

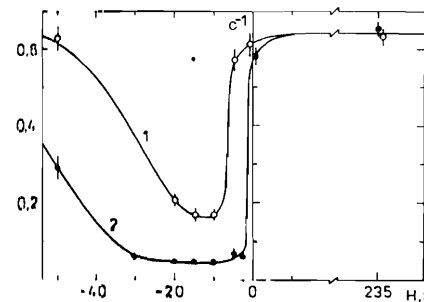


Рис. I. Кривые пропускания для 2-слойного (1) и четырех-слойного (2) затворов ультрахолодных нейтронов.

спектра используемых нейтронов неизвестна).

Глубина модуляции - отношение скоростей счета в открытом и закрытом состояниях - составляла в данном случае $3,73 \pm 0,3$ для двух-

Объединенный институт
 ядерных исследований
 Библиотека

слоистой и $13,7 \pm 1,3$ для четырехслойного затворов. Ослабление затворов в открытом состоянии, т.е. отношение скоростей счета нейтронов, прошедших через затвор и через чистую кремниевую пластину-подложку, составило соответственно $0,352 \pm 0,016$ и $0,365 \pm 0,017$. Если учесть, что для идеального затвора за счет поляризации нейтронов пропускание должно быть равно 0,5, то ослабление за счет несовершенства затвора составило для четырехслойной системы $0,73 \pm 0,034$.

Одна из возможных причин - неточное соответствие состава изготовленного затвора расчетному из-за неравномерного по составу испарения смеси, это приводит к повышению граничной энергии по сравнению с расчетом. Другая возможная причина - окисление поверхности ферромагнетика может привести к тому же эффекту.

Для некоторых применений полученная глубина модуляции и ослабления потока нейтронов вполне удовлетворительна.

Быстродействие затвора определяется временем прохождения нейтрона через запирающий слой. Возможные применения описаны в /3/.

В настоящей работе мы использовали такой затвор для время-пролетной корреляционной спектроскопии УХН.

На рис.2 показан спектр по времени пролета нейтронов, прошедших через интерференционный фильтр /4-5/, структура которого указана на вставке к рис.2.

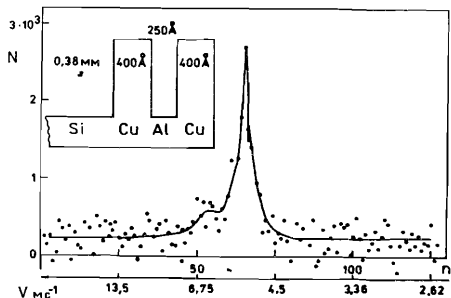


Рис.2. Спектр по времени пролета нейтронов, прошедших через интерференционный фильтр, схема которого показана на вставке.

Длина пролетной базы 106 см, период $T = 0,4$ с, длина псевдослучайной последовательности $N = 127$. Нейтроны регистрировались с помощью "всеволонового" детектора УХН с вращающимся гофрированным радиатором /6/. Стационарное магнитное поле (~ 10 Э), обеспе-

чивающее запираение затвора, и импульсное поле, задаваемое псевдослучайной последовательностью (+20 Э), создавались при помощи соответствующих катушек Гельмгольца. Как и следовало ожидать, в спектре наблюдается изолированный пик при скорости нейтронов $5,1 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$, соответствующий квазисвязанному состоянию нейтрона при энергии 136 эВ, образованному в алюминиевом промежутке между двумя потенциальными барьерами из меди.

В принципе, с использованием такого затвора может быть достигнуто весьма высокое энергетическое разрешение. При толщине запирающего слоя 2 мкм и скорости нейтрона в среде $2 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ время пролета через запирающий слой составляет 1 мкс. При длительности открытого состояния 10 мкс и длине пролетной базы 1 м при энергии 100 эВ энергетическое разрешение составит 10^{-11} эВ.

Существует, однако, принципиальный предел энергетического разрешения из-за соотношения неопределенностей $\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar/2$:

$$\Delta E \geq \left(\frac{8 \hbar^2 E^3}{m L^2} \right)^{1/4}, \quad (2)$$

что в несколько раз ухудшает разрешение для рассмотренного примера. Корреляционная спектроскопия в этом случае особенно удобна, т.к. электронная модуляция обеспечивает точную синхронизацию модулятора и временного анализатора.

Возможно применение таких затворов и для наблюдения нестационарных квантово-механических явлений.

Измерения с нейтронами проводились частично на канале ультрахолодных нейтронов /7/ реактора ИР-8 Института атомной энергии им.И.В.Курчатова.

Авторы благодарны В.И.Морозову, Ю.Н.Панину и Е.В.Рогову за предоставление возможности проведения измерений.

Литература

1. Новопольцев М.И., Покотилковский Ю.Н.-Письма в ЖТФ, 1979, т.5, с.1181.
2. Новопольцев М.И., Покотилковский Ю.Н.-ЖТФ, 1982, т. 6, с. 243.

3. Новопольцев М.И., Покотилловский Ю.Н., Шелкова И.Г. — ПТЭ, 1985, № 4, с. 31.
4. Steinhauser K.-A. et al. - Phys.Rev.Lett., 1980, 44, p.1306.
5. Новопольцев М.И., Покотилловский Ю.Н. Сообщение ОИЯИ РЗ-81-828, Дубна, 1981.
6. Novopoltsev M.I., Pokotilovskii Yu.N. - Nucl.Instr.Meth., 1980, 171, p.497.
7. Морозов В.И., Панин Ю.Н., Рогов Е.В. Препринт ИАЭ-4410/2, М., ЦНИИатоминформ - 1987.

Рукопись поступила в издательский отдел
23 июля 1987 года.

Новопольцев М.И., Покотилловский Ю.Н.,
Шелкова И.Г. РЗ-87-578
Времяпролетная спектрометрия ультрахолодных нейтронов
на основе тонкопленочного ферромагнитного прерывателя
Исследованы многослойные тонкопленочные ферромагнитные
затворы для ультрахолодных нейтронов. Затворы изготовлены
методом термического испарения из специальных изотопных
смесей ферромагнитных металлов /пермаллой-железо/. Достиг-
нута глубина модуляции потока нейтронов ~ 14 , пропускание
затвора в открытом состоянии 0,36. Затвор применен для из-
мерения методом времяпролетной корреляционной спектромет-
рии спектра нейтронов, прошедших через нейтронный интерфе-
ренционный фильтр. Указаны возможные применения. Реально
достижимо разрешение 10^{-11} эВ.
Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.
Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1987

Перевод О.С.Виноградовой

Novopoltsev M.I., Pokotilovskij Yu.N.,
Shelkova I.G. РЗ-87-578.
Time-of-Flight Spectroscopy of Ultracold Neutrons
with a Thin Film Ferromagnetic Chopper
Multilayer thin film ferromagnetic shutters for ultra-
cold neutrons are investigated. The shutters are manufac-
tured by the method of thermal evaporation from special
isotopic mixtures of ferromagnetic metals. The reached
depth of modulation of the neutron flux ~ 14 , the transmis-
sion through the opened shutter is 0.36. The shutter is
used for the time-of-flight correlation measurement of the
spectrum of neutrons transmitted through the neutron re-
ference filter.
The investigation has been performed at the Laboratory
of Neutrons Physics, JINR.
Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1987