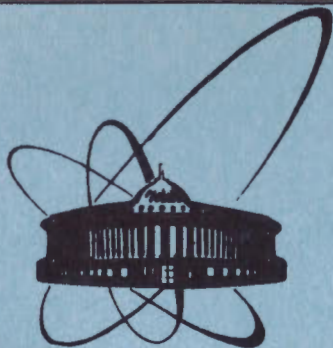


2/11/84



ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

P3-84-219

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

МОДУЛЯЦИЯ ПОТОКА
УЛЬТРАХОЛОДНЫХ НЕЙТРОНОВ
С ПОМОЩЬЮ ТОНКОПЛЕНОЧНОГО
ФЕРРОМАГНИТНОГО ЗАТВОРА

Направлено в журнал "Приборы и техника
эксперимента"

* Мордовский университет, г. Саранск

1984

$V/1/$ описан принцип и экспериментально продемонстрировано действие /в стационарном и импульсном режимах/ затвора для ультрахолодных нейтронов, состоящего из чередующихся ферромагнитных фольг с различной коэрцитивной силой. Работа затвора основана на том, что энергия взаимодействия медленного нейтрона

с веществом имеет вид: $U = \frac{h^2}{2m} Nb \pm \mu B = U_{\text{яд}} \pm U_{\text{магн}}$ где b - коге-

рентная длина рассеяния нейтронов на связанных ядрах среды, N - число ядер в единице объема, m - масса нейтрона, μ - его магнитный момент, B - магнитная индукция. Знаки $+$ и $-$ соответствуют параллельной и антипараллельной ориентациям спина нейтрона и направления магнитной индукции.

Следующие один за другим слои ферромагнетика с противоположной намагниченностью, достигнутой путем соответствующего подбора величины внешнего магнитного поля, должны отражать нейтроны обеих поляризаций в диапазоне энергий $\Delta U_{\text{раб}} = [U_{\text{яд}} - U_{\text{магн}}, U_{\text{яд}} + U_{\text{магн}}]$ при условии отсутствия адиабатического поворота спина нейтрона в промежутках между слоями. Намагничивание всех ферромагнитных слоев в одном направлении создает открытое состояние затвора, так что сквозь него могут проходить нейтроны со спином, направленным против поля с энергией выше $U_{\text{яд}} - U_{\text{магн}}$.

Возможность модуляции потока нейтронов с помощью затвора, состоящего из весьма тонких, напыленных одна на другую ферромагнитных пленок, ранее не рассматривалась. В наших опытах затворы создавались путем последовательного термического напыления /без разгерметизации/ в вакууме слоев пермаллоя /50% Ni - 50% Fe/ и железа армо на поверхность полированных кремниевых пластин толщиной 0,38 мм. Для пермаллоя этого состава $U_{\text{яд}} - U_{\text{магн}} = 140$ нэВ. Магнитные свойства полученных слоистых пленок исследовались с помощью вибрационного магнитометра, типа описанного в^{2/}. В процессе напыления поддерживались необходимые условия: вакуум $\sim 10^{-5}$ Тор, температура подложки 200-250°C, магнитное поле в плоскости пленок ~ 50 Э для улучшения магнитных свойств путем создания оси легкого намагничивания /одноосная анизотропия/. Толщина каждого ферромагнитного слоя составляла 100-200 нм, при меньшей толщине заметно возрастала коэрцитивная сила. На рис.1 показан пример кривой намагничивания двухслойной системы железо - пермаллой. Для четырех и более слоев характер кривых сохранялся, однако, видимо, вследствие процессов взаимодействия между соседними слоями^{3/} и неизбежного разброса между их свойствами кривые были существенно сглажены.

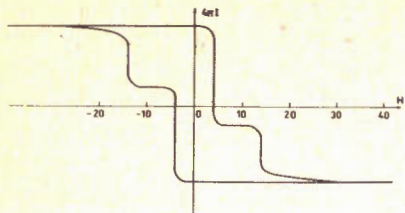


Рис.1. Кривая намагничивания для системы: пермаллой 50нм /200 нм/, Si /200 нм/, Fe /100 нм/ /поле в Э/.

Эксперименты показали, что при последовательном напылении ферромагнитных слоев без разделяющей прослойки запирающее действие затвора практически отсутствовало, несмотря на то, что характер кривых типа приведенных на рис.1, отчетливо указывал на существование слоев с сильно отличающейся коэрцитивной силой.

Возможное объяснение этому явлению - возникновение между противоположно намагниченными слоями переходной области, в которой происходит адиабатический поворот спина^{14/}. Вероятность его $w = 1 - e^{-\pi\omega\tau}$, где $\omega = \mu B/\hbar$ - частота ларморовской прецессии в поле B, τ - эффективное время поворота поля, $\tau = d/v$, где d - толщина переходной области, v - скорость нейтрона в веществе. При $B = 10^4$ Гс, $v = 3$ м/с и $d > 20$ нм, $w \approx 1$.

Для уменьшения взаимодействия между слоями и подавления таким путем образования переходной области с меняющимся в пространстве направлением намагниченности исследовалась возможность разделения соседних ферромагнитных слоев прослойкой из немагнитного материала. Выбор такого материала диктовался возможностью термического напыления в вакууме и низкой граничной энергией для нейтронов. Были испробованы прослойки из Al, Pb, Bi, SiO₂ и Si, но только в последнем случае удалось получить удовлетворительную степень модуляции потока нейтронов.

На рис.2 показаны кривые пропускания нейтронов /энергия используемых нейтронов заключалась в диапазоне 50-180 нэВ/ для двухслойной и четырехслойной систем. Глубина модуляции /отношение скоростей счета нейтронов в открытом и закрытом состояниях/ составляла соответственно 4,6±0,2 и 7,7±1,5. Для некоторых применений эта глубина модуляции достаточна, однако было бы желательно существенно улучшить ее как путем увеличения числа слоев, так и повышением поляризующих свойств каждого из них, от чего в значительной степени зависят свойства затвора.

Быстродействие затвора определяется временем прохождения нейтрона через толщину запирающих слоев, время перемагничивания пленок может быть весьма коротким /менее 10⁻⁹ с/ и не ограничивает быстродействия. Возможны следующие применения затворов:

- 1/ Постановка экспериментов по наблюдению нестационарных эффектов, типа предложенных в^{15/}.
- 2/ Спектроскопия ультрахолодных нейтронов высокого разрешения. При толщине запирающего слоя 5 мкм и скорости нейтрона в среде 2 м/с допустимо время открытого состояния затвора, равное 10 мкс, что при длине пролетной базы L = 1 м могло бы дать

энергетическое разрешение $\Delta E < 10^{-11}$ эВ. Однако надо отметить существование принципиального предела разрешающей способности вследствие соотношения неопределенностей $\Delta E \cdot \Delta t > \hbar$; $\Delta E \lesssim (2^{3/2} \hbar \mu E^{3/2})^{1/2} / L$,

что ухудшает приведенное значение, но тем не менее позволяет работать с разрешением $\Delta E < 10^{-9}$ эВ*. Особенно удобна здесь корреляционная спектроскопия, т.к. электронная модуляция обеспечивает очень точную синхронизацию модулятора и временного анализатора. К другим преимуществам, по сравнению с механической модуляцией, надо отнести малую толщину и большую площадь модулятора. Недостаточно глубокая модуляция не является серьезным препятствием для корреляционной спектроскопии, поскольку нейтроны, проходящие сквозь затвор в закрытом его состоянии, могут рассматриваться как добавка к постоянному фону, который эффективно подавляется при вычислении корреляционной функции. Очевидно, что можно модулировать поток и более быстрых нейтронов, при этом их энергия E должна находиться в диапазоне $\Delta U_{\text{раб}} / \cos^2 \theta$, где θ - угол падения нейтронов на поверхность затвора.

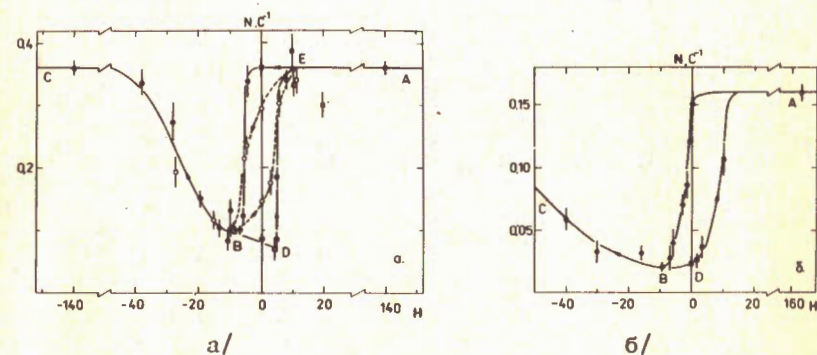


Рис.2. Кривые пропускания для затворов: а/ двухслойного, б/ четырехслойного. Стрелки указывают на направление изменения магнитного поля /Э/. Пунктиром показана кривая пропускания при намагничивании в направлении, перпендикулярном оси легкого намагничивания. Участок ВДЕ проходил начиная с точки В.

В недавней работе^{17/} экспериментально проверялось соотношение $\Delta E \cdot \Delta t > \hbar$ для электромагнитного излучения методом быстрой модуляции мёссбауэровских γ -квантов. Аналогично можно было это сделать для нейтронов с использованием описываемого затвора.

3/ Определенный интерес также представляет спектроскопия неупругого рассеяния ультрахолодных нейтронов, имеющая целью изучение процессов с малыми передачами энергии / $\sim 10^{-9}$ - 10^{-6} эВ/. Использование ферромагнитных затворов с различным изотопным составом позволяет регулировать энергию нейтронов, падающих на образец.

4/ Создание магнитных затворов для накачки ультрахолодных нейтронов от импульсных источников^{16/} сейчас кажется более трудной задачей из-за недостаточно высокой степени запираения нейтронов. Здесь необходимо дополнительное исследование причин недостаточной поляризации нейтронов при их прохождении через ферромагнитные пленки.

Авторы признательны В.И.Морозову за предоставление возможности проведения измерений, а также М.Б.Бунину - за автоматизацию магнитометра.

ЛИТЕРАТУРА

1. Новопольцев М.И., Покотилловский Ю.Н. Письма в ЖТФ, 1979, 5, с. 1181; ЖТФ, 1982, 6, с. 243.
2. Foner S. Rev.Sci.Instr., 1956, 27(7), p. 548; 1959, 30(7), p. 548.
3. Йелон К. В кн.: "Физика тонких пленок", М., 1973, т.6.
4. Владимирский В.В. ЖЭТФ, 1960, 39, с. 1062.
5. Герасимов А.С., Казарновский М.В. ЖЭТФ, 1976, 71, с. 1700.
6. Шапиро Ф.Л. ЭЧАЯ, 1962, 2, вып. 4, с. 975; Антонов А.В. и др. Труды ФИАН, 1972, 57, с. 270.
7. Войтовецкий В.К. и др. ЯФ, 1983, 38/3/, с. 662.

Рукопись поступила в издательский отдел
4 апреля 1984 года.

Новопольцев М.И., Покотилловский Ю.Н., Шелкова И.Г. P3-84-219
Модуляция потока ультрахолодных нейтронов с помощью тонкопленочного ферромагнитного затвора

Измерена модуляция потока ультрахолодных нейтронов с помощью двухслойных и четырехслойных тонкопленочных ферромагнитных затворов, имеющих структуру: пермаллой /50% железа - 50% никеля/ - кремний - железо. Достигнута глубина модуляции потока 8 для четырехслойной системы. Указаны возможные применения разработанных затворов для постановки экспериментов по наблюдению нестационарных явлений с ультрахолодными нейтронами и для корреляционной спектроскопии высокого разрешения медленных нейтронов.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1984

Перевод О.С.Виноградовой

Novopoltsev M.I., Pokotilovskij Yu.N., Shelkova I.G. P3-84-219
Modulation of Ultracold Neutron Flux by Means of Thin Film Ferromagnetic Shutters

The modulation of ultracold neutron flux is measured with the help of the two- and four-layer thin film ferromagnetic shutters having the structure: permalloy (50% iron-50% nickel)-silicon-iron. The modulation depth on the flux as much as 8 has been achieved for four-layer system. The possible application of developed shutters are pointed out in experiments on observation of nonstationary phenomena with ultracold neutrons and for high resolution correlation spectroscopy of slow neutrons.

The investigation has been performed at the Laboratory of Neutron Physics, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1984