

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

DD

P3-98-374

В.Л.Аксенов, Н.А.Гундорин, Ю.В.Никитенко,
Ю.П.Попов, Л.Чер*

НАБЛЮДЕНИЕ СТОЯЧИХ НЕЙТРОННЫХ ВОЛ
ПРИ ПОЛНОМ ОТРАЖЕНИИ НЕЙТРОНОВ
МЕТОДОМ ПРЕЦИЗИОННОЙ
ГАММА-СПЕКТРОСКОПИИ

Направлено в «ЖЭТФ»

*KFKI, Будапешт, Венгрия



CERN LIBRARIES, GENEVA

1998

1. ВВЕДЕНИЕ

При распространении нейтронов или рентгеновского излучения в слоистой структуре образуется стоячая волна. Стоячая нейтронная волна является периодическим пространственным распределением плотности нейтронов. Она проявляется, в частности, через периодическую зависимость вероятности поглощения нейтрона от перпендикулярной к границам раздела слоистой структуры компоненты волнового вектора. В связи с этим первый [1] и дальнейшие [2-7] эксперименты с нейтронами по наблюдению стоячей волны в кристалле состояли в демонстрации реализации "аномальных" процессов захвата [2-4] и некогерентного рассеяния [5], проверке нарушения когерентности при резонансном рассеянии [6,7].

В [8] было предложено использовать рентгеновскую стоячую волну для определения структуры. Метод, использующий поле стоячих волн, основан на измерении угловой зависимости интенсивности вторичной радиации (вторичная флуоресценция, фото- и оже-электронная эмиссии). Вторичное излучение несёт информацию об атомах, которые их испустили. В связи с чем, регистрируя характеристическое излучение, можно определить тип атомов, их количество и получить, таким образом, более детальную информацию [9].

Для нейтронов вторичным излучением являются продукты ядерных реакций (гамма-излучение, протоны, альфа-частицы), некогерентно и неупругорассеянные нейтроны, а также нейтроны, изменившие спиновое состояние. Радиационный захват нейтронов и связанное с ним гамма-излучение присущи большинству изотопов. Для отдельных изотопов гадолиния, самария, кадмия и других элементов сечение этой реакции в области тепловых нейтронов достигает десятков килобарн. В связи с этим

представляется перспективным использовать канал регистрации гамма-квантов при регистрации нейтронных стоячих волн.

В [10] сообщалось о наблюдении через регистрацию гамма-излучения, связанного с захватом нейтронов, стоячих нейтронных волн в слоистой структуре с характерными толщинами слоёв порядка сотен ангстрем. В эксперименте измерялась интенсивность гамма-излучения от слоя гадолиния в зависимости от угла скольжения пучка нейтронов. Наблюдённая зависимость имела ряд максимумов при определённых значениях перпендикулярной компоненты волнового вектора. Эти максимумы соответствуют различным порядкам поглощения нейтронной волны. Авторы делают вывод о наблюдении резонансно-усиленных стоячих волн. Однако, из-за большого поглощения нейтронов гадолинием, режим резонансно-усиленных волн был осуществлён только в случае, когда на слое гадолиния находился узел стоячей волны.

В своём исследовании мы преследовали цель наблюдения стоячих волн в слоистой магнитной структуре путём регистрации гамма-излучения от слоя гадолиния, используя метод времени пролёта на импульсном источнике поляризованных нейтронов. Метод времени пролёта позволяет получить информацию в широком интервале длин волн. Использование же поляризованных нейтронов позволяет измерять отношение счёта гамма-квантов, соответствующих поляризации пучка нейтронов по направлению магнитного поля и против. Применение обоих факторов позволяет более надёжно выделить небольшие эффекты волнового поля стоячих волн.

2. ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ АППАРАТУРА

Измерения были проведены на спектрометре поляризованных нейтронов СПН реактора ИБР-2. На рис. 1. приведена схема

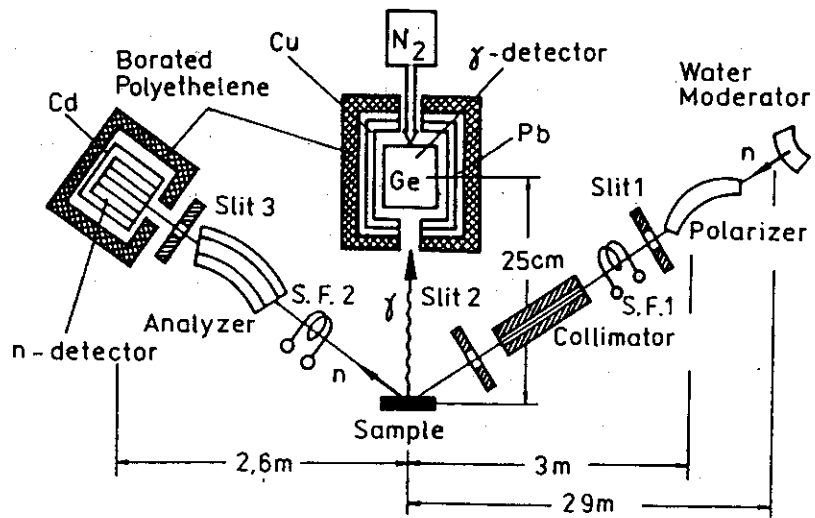


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

экспериментальной установки. Нейтронный пучок, поступающий с выхода поляризатора, коллимировался кадмиевыми диафрагмами на базе пролёта 3 м до образца. При этом среднеквадратичное отклонение угла скольжения $\theta = 2,85$ мрад падающего пучка нейтронов в направлении по нормали к отражающей поверхности образца составляло $\pm 0,25$ мрад. Отражённый от образца пучок нейтронов регистрировался газовым ^3He -детектором, расположенным от образца на расстоянии 2,6 м. Уровень фонового счёта, регистрируемый детектором, составлял 10^{-2} н/с. Для монохроматизации пучка нейтронов использовалась методика измерения времени пролёта. При этом пролётная база составляла 31,6 м. Среднеквадратическое отклонение измеряемого значения длины волны λ , определяемое длительностью импульса нейтронов в замедлителе, составляло $0,02\text{\AA}$.

Прецизионная спектроскопия гамма-излучения проводилась с использованием антикомптоновского гамма-спектрометра на основе германиевого детектора (HPGe) [11], установленного в направлении по нормали к поверхности образца на расстоянии 25 см от него. Для снижения

уровня фона применялась пассивная комбинированная защита, состоящая из 5 см борированного полиэтилена, 10 см свинца и 1 см меди. Подавление комптоновской подложки в 3÷5 раз в измеряемом гамма-спектре для интервала энергий гамма-квантов 100÷500 кэВ достигалось применением активной защиты детектора из BGO-сцинтилляторов в сочетании с логикой антисовпадений электронной схемы спектрометра. Таким образом, многомерный измерительный модуль, регистрирующий время пролёта нейтрона и энергию сопутствующего его захвату гамма-кванта, позволил одновременно реализовать спектрометрию нейтронов по методу времени пролёта и спектрометрию гамма-излучения.

Образец представлял из себя многослойную структуру, содержащую слой железа (1000Å) и слой гадолиния (50Å), нанесённых на подложку из стекла толщиной 5 мм. Подложка имела размеры 100 мм(по горизонтали)×60 мм(по вертикали). Образец был помещён в магнитное поле напряжённостью 300 Ое.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

На рис. 2. показан энергетический спектр гамма-квантов, связанный с захватом нейтронов в образце. Один канал здесь соответствует 1,4 кэВ. Пики при энергии гамма-квантов 199,2 кэВ и 181,9 кэВ, соответствуют резонансам в сильнопоглощающих изотопах ^{155}Gd (содержание в естественной смеси 14,7%) и ^{157}Gd (содержание в естественной смеси 15,68%) при длине волны 1,74Å и 1,61Å соответственно. Видно, что площадь фотопика составляет порядка 50-150% от площади подложки. Для повышения надёжности измерения были проведены с пучками нейтронов, поляризованных по направлению ("+" поляризация) и против направления ("- " поляризация) внешнего магнитного поля. В качестве отражателя нейтронов был использован слой железа, намагниченный во внешнем магнитном поле. Намагниченному до насыщения железу соответствуют два

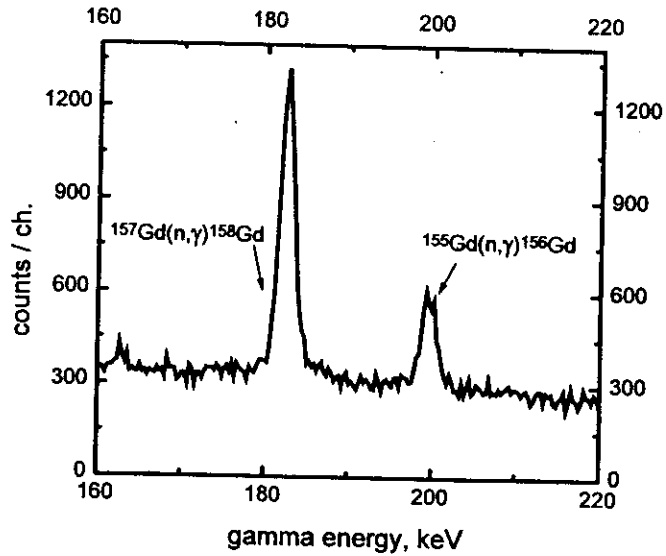


Рис. 2. Спектр гамма-квантов в энергетическом интервале 50÷250 кэВ

граничных значения длины волны нейтрона $\lambda_+ = 490\text{\AA}$ и $\lambda_- = 895\text{\AA}$, соответствующих "+" и "-" спиновым состояниям нейтрона в магнитном поле. Для перпендикулярной к поверхности образца длины волны нейтрона $\lambda_1 = \lambda / \sin(\theta)$, превышающей граничную длину волны (для соответствующего спинового состояния), нейтрон испытывает полное отражение от слоя железа. При этом, амплитуда (квадрат модуля волновой функции) "+" (" - ") стоячей волны достигает максимума при $\lambda_1 = \lambda_+(\lambda_-)$. При увеличении длины волны выше её граничного значения, амплитуда стоячей волны уменьшается, стремясь к нулю. В связи с этим в интервале длин волн, меньшем граничной длины волны для "+" спинового состояния ($\lambda_1 < \lambda_+$), отношение I_+/I_- интенсивности счёта гамма-квантов для плюс и минус спиновых состояний падающего пучка будет больше единицы, в то время как при $\lambda_1 > \lambda_-$ это отношение будет меньше единицы. При расстройке когерентности распространения нейтронной волны процесс отражения не может быть представлен суперпозицией бегущих навстречу волн. В этом

случае интенсивность счёта гамма-квантов будет пропорциональна сумме падающего и отражённого потоков нейтронов, а поляризационное отношение будет больше единицы во всём интервале длин волн.

На рис. 3 приведена длинноволновая зависимость поляризационного отношения счёта $g(\text{off/on})=I(\text{off})/I(\text{on})$ при выключенном "off" и включенном "on" спин-флиппере в интервале длин волн $1+3,5\text{\AA}$. Видно, что поляризационное отношение превышает единицу в области длин волн меньше $2,2\text{\AA}$ и становится меньше единицы в интервале длин волн больше $2,2\text{\AA}$. Такой характер зависимости обусловлен интерференцией встречно распространяющихся нейтронных волн. Из подгонки расчёта к экспериментальным данным получена кривая 2 (см.рис. 3). Этой кривой соответствуют следующие значения параметров слоистой структуры:

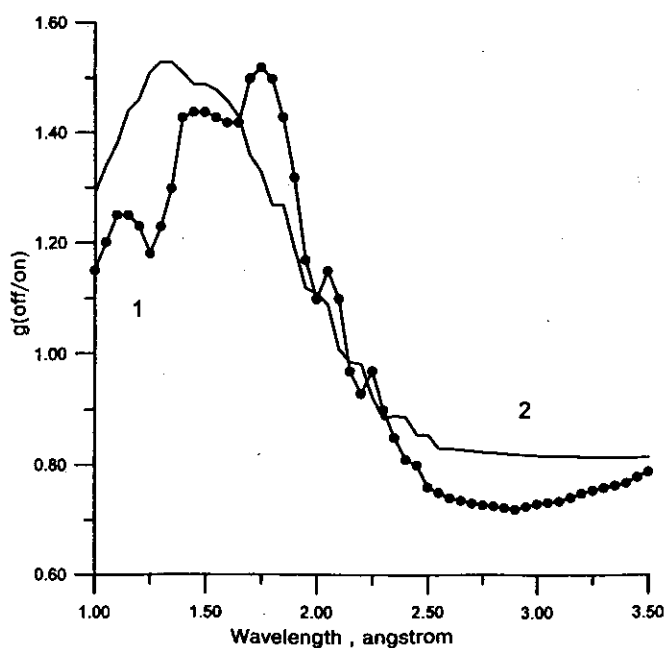


Рис. 3. Зависимость поляризационного отношения счёта гамма-квантов от длины волны нейтрона

индукция в слое железа $B=21,6\text{кОе}$, угол между внешним полем и вектором намагниченности слоя железа $\beta=50^\circ$, толщина слоя гадолиния 35Å , слой окиси гадолиния Gd_2O_3 толщиной 170Å и плотностью, составляющей $0,225$ от плотности кристаллического состояния. Обращает на себя внимание большое значение параметра β . Это может быть связано с наличием намагниченности слоя гадолиния. При этом взаимодействие магнитных моментов атомов железа и гадолиния приводит к образованию между слоями гадолиния и железа некоторого промежуточного слоя, в котором вектор намагниченности в направлении, перпендикулярно слоям, изменяет ориентацию [12,13]. Дальнейшие эксперименты и расчёты должны ответить на вопрос: с чем связано большое значение β ? В то же время на кривых рис. 3 видны осцилляции, связанные с интерференцией нейтронных волн в слоях железа и гадолиния. Проявление интерференции нейтронов в отдельных слоях структуры через поляризационное отношение $g(\text{off/on})$ указывает на возможность измерения через канал регистрации гамма-квантов деталей магнитной структуры.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведённого исследования показывают, что реакция (n,γ) может быть использована для измерения длинноволновой зависимости плотности нейтронов в слоях сильнозахватных изотопов (Gd,Sm,Cd) толщиной в несколько ангстрем. Оценки показывают, что вполне достижимым является измерение гамма-излучения от слоя ядер с сечением захвата тепловых нейтронов порядка 100 барн. Это значительно расширит круг элементов, обнаружение и определение пространственного положения которых в мультиструктуре будет возможно методом стоячих нейтронных волн.

Авторы пользуются случаем, чтобы поблагодарить М.В. Ковальчука, С.И. Жёлудеву и В.А. Соменкова за стимулирующее обсуждение работы.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 97-02-17326а и 98-02-17037).

Литература

1. J.W. Knowles, *Acta Crystallographica*, **9**, 61 (1956).
2. D. Sippel, K. Kleinstuck, G.E.R. Schulse, *Phys. Stat. Sol.* **2**, 104 (1962).
3. D. Sippel, K. Kleinstuck, G.E.R. Schulse, *Phys. Letters* **8**, 241 (1964).
4. F. Eichhorn, D. Sippel, K. Kleinstuck, *Phys. Stat. Sol.* **23**, 237 (1967).
5. D. Sippel, F. Eichhorn, *Acta Crystallogr.* **A24**, 237 (1968).
6. С.Ш. Шильштейн, В.И. Марухин, М. Каланов и др., *Письма ЖЭТФ* **12**, 80 (1970).
7. С.Ш. Шильштейн, В.А. Соменков, В.П. Докашенко, *Письма ЖЭТФ* **13**, 301 (1971).
8. V.V. Batterman, *Appl.Phys.Lett.* **1**, 68 (1962).
9. М.В. Ковальчук, В.Г. Кон, *Успехи физических наук* **149**, 69 (1986).
10. H. Zhang, P.D. Galagher, S.K. Satija et.al, *Phys. Rev. Lett.* **72**, 3044 (1994).
11. W.I. Furman, N.A. Gundorin, Yu.N. Kopach et al, *Proc. of Int. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology, Trieste, Italy, 19-24 May*, 565 (1997).
12. R.E. Camley, D.R. Tilley, *Phys.Rev. B*, **37**, 3413 (1988).
13. C. Dufour, K. Cherifi, G. Machal, Ph. Mangin, M. Hennion, *Phys. Rev.* **47**, 14572 (1993).

Рукопись поступила в издательский отдел
23 декабря 1998 года.

Аксенов В.Л. и др.

P3-98-374

Наблюдение стоячих нейтронных волн при полном отражении нейтронов методом прецизионной гамма-спектроскопии

Методами регистрации нейтронов и гамма-квантов, вызванных захватом тепловых нейтронов, исследовано полное отражение поляризованных нейтронов от слоистой структуры стекло/Fe (1000 Å)/Gd (50 Å). Измерено поляризационное отношение счета гамма-квантов для случаев пучка нейтронов, поляризованного по направлению магнитного поля и против. Значение поляризационного отношения превышает единицу для длин волн нейтрона $\lambda < 2,2 \text{ \AA}$ и меньше единицы при длинах волн $\lambda > 2,2 \text{ \AA}$. Такой характер длинноволновой зависимости поляризационного отношения счета гамма-квантов указывает на образование над поверхностью слоя железа нейтронной стоячей волны, образованной интерференцией падающей нейтронной волны и волны, отраженной от слоя намагниченного железа.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики им. И.М.Франка ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 1998

Перевод авторов

Aksenov V.L. et al.

P3-98-374

Observation of Neutron Standing Waves at Total Reflection by Precision Gamma-Spectroscopy

Total reflection of polarized neutrons from the layered structure glass/Fe (1000 Å)/Gd (50 Å) is investigated by registering neutrons and gamma-quanta from thermal neutron capture. The polarization ratio of gamma counts of neutron beams polarized in and opposite the direction of the magnetic field is measured. The polarization ratio is larger than unity for the neutron wavelengths $\lambda < 2.2 \text{ \AA}$ and it is smaller than unity for $\lambda > 2.2 \text{ \AA}$. Such behavior of the wavelength dependence of the gamma-quanta polarization ratio points to the fact that over the surface of the Fe layer a neutron standing wave caused by the interference of the incident neutron wave and the wave refracted from the magnetized Fe layer is formed.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 1998

Редактор Е.Ю.Шаталова. Макет Н.А.Киселевой

Подписано в печать 05.02.99
Формат 60 × 90/16. Офсетная печать. Уч.-изд. листов 0,99
Тираж 325. Заказ 51157. Цена 1 р. 11 к.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
Дубна Московской области