

## НОВЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФЕРРОМАГНИТНЫХ ПЛЕНОК НА УЛЬТРАХОЛОДНЫХ НЕЙТРОНАХ

Ю. В. Таран

Разработан новый метод измерения поляризационных характеристик ферромагнитных пленок на ультрахолодных нейтронах /УХН/ путем одно-, двух- и трехкратного пропускания пучка УХН через одну и ту же пленку. Для реализации метода предложено устройство, содержащее две накопительные ловушки УХН, соединенные зеркальным нейтроноводом. В разрыве нейтроновода устанавливается исследуемая пленка. По обе стороны пленки расположены спин-флипперы. Каждая ловушка снабжена тремя затворами, позволяющими наполнять ее УХН и выпускать их в нейтроновод или на детектор. Выпущенные из одной ловушки в нейтроновод УХН перехватываются другой ловушкой. Пленка может выдвигаться из нейтроновода и поворачиваться на  $180^\circ$ . Манипулируя флиппером и пленкой, проводят измерения интегральных поляризующих параметров пленки: пропускания, поляризующей и анализирующей способностей и так называемого  $S$ -фактора, представляющего собой четвертую независимую линейную комбинацию элементов квадратной  $2 \times 2$  матрицы пропускания пленки. С использованием измеренных параметров восстанавливают матрицу пропускания пленки и проводят сравнение с теоретическими моделями деполяризации УХН при прохождении через ферромагнитную пленку.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

A New Method for the Measurement  
of the Polarization Characteristics  
of Ferromagnetic Films on Ultracold Neutrons

Yu. V. Taran

A new method has been developed for measuring the polarization characteristics of ferromagnetic films on ultracold neutrons (UCN) by single-, double- and triple-transmission of UCN beam through one and the same film. To realize the method an installation has been proposed consisting of the two UCN storage bottles connected with by a mirror neutron guide. An investigated film is placed in the slit in the middle of the neutron guide. On both sides of the

film a spin-flipper is installed. Each bottle is equipped with three neutron valves which permit filling in the bottle with UCN and allow one to let UCN out to the neutron guide or detector. The neutrons once let out from one bottle into the neutron guide are caught by the other. The film can be moved out of the neutron guide or rotated by 180°. By manipulating with spin-flippers and the film one may take the integral polarization parameters of the film: transmission, polarizing and analysing efficiencies, so-called S-factor, which is the fourth independent linear combination of the elements of the square 2x2 transmission matrix of the film. The measurement parameters help to restore the film transmission matrix. Then a comparison is drawn with the models of UCN depolarization on transmission through a ferromagnetic film.

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

Успешное использование поляризованных ультрахолодных нейтронов /УХН/ в экспериментах по поиску электрического дипольного момента нейтрона<sup>1,2/</sup> и перспективы их применения в других областях физики УХН по-прежнему сохраняют актуальную задачу повышения эффективности развитого впервые в<sup>3/</sup> метода поляризации УХН пропусканием через намагниченную ферромагнитную пленку /ФП/.

Взаимодействие УХН с ФП описывается квадратной 2x2 матрицей пропускания T:

$$T = \begin{pmatrix} b_{++} & b_{+-} \\ b_{-+} & b_{--} \end{pmatrix} . \quad /1/$$

где  $b_{ij}$  - вероятность того, что нейтрон с начальной проекцией спина  $j$ , соответствующей направлению спина против /+/ или вдоль /-/ намагниченности пленки, окажется после ее прохождения с проекцией  $i$ . Если неполяризованный пучок нейтронов характеризовать двумерным вектором  $\psi_0 = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$ , так что  $\psi'_0 \psi_0 = 2$  /здесь и далее штрих означает транспонирование/, то из элементов матрицы /1/ можно образовать следующие четыре независимые комбинации:

$$T_0 = (\psi'_0 T \psi_0) / (\psi'_0 \psi_0) = \frac{1}{2} (b_{++} + b_{+-} + b_{-+} + b_{--}) , \quad /2/$$

$$P = (\psi'_0 \sigma_z T \psi_0) / (\psi'_0 T \psi_0) = \frac{1}{2T_0} (b_{++} + b_{+-} - b_{-+} - b_{--}) , \quad /3/$$

$$A = (\psi'_0 T \sigma_z \psi_0) / (\psi'_0 T \psi_0) = \frac{1}{2T_0} (b_{++} - b_{+-} + b_{-+} - b_{--}) = \quad /4/ \\ = P - \frac{b_{+-} - b_{-+}}{T_0},$$

$$S = (\psi'_0 \sigma_z T \sigma_z \psi_0) / (\psi'_0 T \psi_0) = \frac{1}{2T_0} (b_{++} - b_{+-} - b_{-+} + b_{--}) = \quad /5/ \\ = 1 - \frac{b_{+-} + b_{-+}}{T_0},$$

где  $\sigma_z$  - матрица Паули.

Первые три величины /2-4/ являются известными интегральными поляризационными параметрами ФП: пропускание  $T_0$ , поляризующая и анализирующая способности  $P$  и  $A$  соответственно.

Обычная проточная схема для поляризационного анализа медленных нейтронов /см., например, /4/ /, содержащая поляризатор, анализатор поляризации и спин-флиппер между ними, позволяет из измерения двухкратного пропускания

$$T_{1,2} = T_{01} T_{02} (1 + \phi P_1 A_2) \quad /6/$$

/здесь  $\phi$  - эффективность флиппера;  $\phi = 1$  или  $\phi = \phi_0 \neq 1$  при выключенном или включенном флиппере; индексы 1 и 2 соответствуют пленкам поляризатора и анализатора/ определить только нижнюю границу произведения  $P_1 A_2$ . Использование двух флипперов ( $\phi = \phi_1 \phi_2$ ) между пленками /5/ дает возможность отдельно измерить  $\phi$  и  $P_1 A_2$ . Дальнейшее разделение в проточном варианте невозможно, поэтому эффективность пленок обычно характеризуют среднегеометрическим значением поляризующей и анализирующей способностей  $\bar{P} = \sqrt{PA}$ . Ситуация становится еще более неопределенной, если учесть переотражения УХН между пленками.

Конечно, при  $P$ , близком к единице, как в случае с монокристаллической ФП /8/, эта неопределенность не играет большой роли. Однако до сих пор не разработана технология изготовления устойчивых монокристаллических пленок. С другой стороны, имеется хорошая технология для поликристаллических пленок. Но с ними удастся достичь  $\bar{P} \leq 85\%$ , что для ряда задач недостаточно. Причина такого заметного снижения поляризующей эффективности неясна. В литературе /7-12/ обсуждались различные механизмы этого явления. Для дальнейшего изучения вопроса и выработки практических рекомендаций не хватает экспериментальной информации о дифференциальных поляризационных характеристиках ФП, т.е. о матричных элементах  $b_{ij}$ .

До последнего времени не существовало метода измерения дифференциальных характеристик ФП. В /13/ такой метод был

предложен, а в<sup>14,15/</sup> была развита соответствующая теория. Идея метода заключается в измерении четвертого интегрального параметра /5/, в дальнейшем называемого S-фактором. Действительно, S-фактор входит в поляризацию УХН после двух пленок:

$$P_{1,2} = \frac{\phi P_1 S_2 + P_2}{1 + \phi P_1 A_2} \quad /7/$$

Проанализировав эту поляризацию с помощью третьей пленки, можно получить информацию об S-факторе. Для этого надо в упомянутой ранее схеме поляризационного анализа с двумя флипперами /5/ установить между ними дополнительную пленку. Тогда, считая ее второй по номеру, получим для трехкратного пропускания:

$$T_{1,2,3} = T_{01} T_{02} T_{03} (1 + \phi_1 P_1 A_2 + \phi_2 P_2 A_3 + \phi_1 \phi_2 P_1 S_2 A_3). \quad /8/$$

Таким образом, пропускание трехпленочной системы зависит от S-фактора второй пленки. В проточном варианте нельзя осуществить достаточное количество независимых измерений, чтобы определить интегральные поляризационные параметры даже в предположении одинаковости пленок. Такая возможность существует в накопительном варианте поляризационного анализа УХН /5/.

В этом варианте пучок УХН после прохождения через пленку разворачивается в обратном направлении и пропускается через пленку с противоположной стороны. В<sup>14/</sup> было показано, что  $\vec{T} = \vec{T}'$  /здесь и далее стрелка показывает направление пучка окончательно фиксированной в пространстве пленки/. Подставляя  $\vec{T}$  в /2-5/, получим

$$\vec{T}_0 = \vec{T}'_0, \quad \vec{P} = \vec{A}, \quad \vec{A} = \vec{P}, \quad \vec{S} = \vec{S}'. \quad /9/$$

Используя /9/ совместно с /6/ и /8/, имеем

$$T_{\vec{z}} = T_0^2 (1 + \phi_1 \vec{P}^2), \quad /10/$$

$$T_{\vec{z}} = T_0^2 (1 + \phi_2 \vec{P}^2), \quad /11/$$

$$T_{\vec{z}} = T_{\vec{z}} = T_0^3 (1 + \phi_1 \vec{P}^2 + \phi_2 \vec{P}^2 + \phi_1 \phi_2 \vec{P} \vec{S} \vec{P}); \quad /12/$$

при этом флипперы с эффективностью  $\phi_{10}$  и  $\phi_{20}$  расположены справа и слева от пленки\*.

\* Для независимого определения  $\phi_{10}$  и  $\phi_{20}$  измерения двукратного пропускания осуществляются с тремя состояниями каждого флиппера: выключен или включен при прямом и обратном ходе пучка, включен при прямом и выключен при обратном ходе или наоборот.

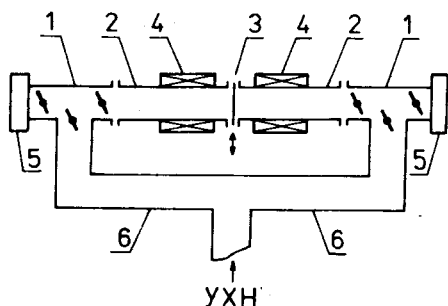


Рис.1. Схема установки для поляризационного анализа УХН в накопительном варианте: 1 - ловушка, 2 - зеркальный нейтроновод, 3 - ферромагнитная пленка, 4 - спин-флиппер, 5 - детектор УХН, 6 - подводящий нейтроновод.

Из /10-12/ определяются параметры  $\vec{P}$ ,  $P$  и  $S$ , а из /2-5/ - матричные элементы  $b_{ij}$ .

Для реализации описанного метода восстановления матрицы пропускания ФП в <sup>18/</sup> было предложено устройство /рис.1/, содержащее две накопительные ловушки 1 УХН, соединенные зеркальным нейтроноводом 2. В разрыве нейтроновода устанавливается исследуемая ФП 3. По обе стороны пленки расположены адиабатические спин-флипперы 4 <sup>17/</sup>. Для измерения пропускания  $T_0$  пленка может выдвигаться из разрыва нейтроновода, оставаясь в зазоре намагничивающего ее магнита /последний на рис.1 не показан/, а также поворачиваться на  $180^\circ$  вокруг оси, направленной вдоль магнитного поля /при этом магнитное состояние пленки остается неизменным/. На ловушках установлены детекторы 5 УХН. Для ввода УХН от источника в ловушки служат подводящие нейтроноводы 6, которые позволяют начинать измерения с любой из ловушек, что в сочетании с поворотом пленки полностью симметризует процедуру измерений.

Накопленные в одной из ловушек УХН выпускаются в зеркальный нейтроновод и перехватываются другой ловушкой. Перед обратным выпуском УХН из второй ловушки нейтроны, оставшиеся в первой ловушке и нейтроноводом после первого перетекания, удаляют, выпуская их на детектор первой ловушки или ввода поглотитель.

Анализ перетекания УХН с начальным максвелловским спектром из одной ловушки в другую показал <sup>18/</sup>, что во второй ловушке можно перехватить максимально  $N_{\max} = d \cdot N_0$  УХН, где  $N_0$  - стартовое количество УХН в первой ловушке,  $d$  - параметр, зависящий от длин ловушки  $\ell_n$  и нейтроновода  $\ell_n$ :

$$d = 8 / \sqrt{-S_1 R_1 - S_2 R_2 + S_3 R_3 + S_4 R_4}, \quad /13/$$

где  $S_i = 2(\tau + i) - 1$ ,  $R_i = (\tau + i - 1)^2 + (\tau + i)^2$ ,  $i = 1 \div 4$ ,  $\tau = \ell_n / \ell_n^*$ . На рис.2 приведены зависимости параметра  $d$

<sup>18/</sup> в выражении для  $d$  индексы ошибочно увеличены на единицу.

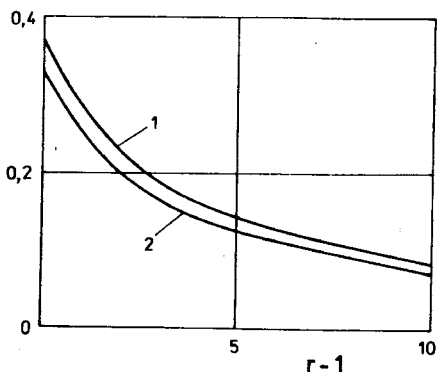


Рис.2. Зависимости максимальной /кривая 1/ и установившейся /кривая 2/ доли УХН, перехваченных второй ловушкой из первой, как функция параметра  $\gamma - 1$ .

/кривая 1/ и отношения объема ловушки  $V_{\text{л}}$  и всей установки  $2V_{\text{л}} + V_{\text{н}}$  /кривая 2/ от  $\gamma$ . Для реалистических значений  $\gamma = 5 \div 10$  можно перехватить  $17 \div 10\%$  УХН, что даже несколько выше соответствующих установившихся значений, даваемых кривой 2. При этом спектр захваченных УХН, во-первых, не засорен нейтронами, побывавшими в ловушке ранее, а значит, возможно, вторично взаимодействовавших с ФП, а во-вторых, практически близок к максвелловскому /частично срезана мягкая часть спектра/.

Экспериментально определенная с помощью описанной установки матрица  $T$  должна в дальнейшем анализироваться на основе существующих моделей деполяризации УХН при прохождении через ФП. В<sup>6-12,14,15</sup> обсуждались: 1/ модель неполной намагниченности /или обратных доменов/ с матрицей

$$T_1 = r \begin{pmatrix} 1 - \alpha & 0 \\ 0 & \alpha \end{pmatrix}, \quad /14/$$

где  $\alpha$  - доля площади обратных доменов,  $r$  - параметр, учитывающий поглощение УХН в ФП; 2/ модель поверхностной деполяризации с прямой матрицей

$$\vec{T}_2 = r \begin{pmatrix} (1 - \beta_2)(1 - \beta_1) & (1 - \beta_2) \beta_1 \\ \beta_2 (1 - \beta_1) & \beta_2 \beta_1 \end{pmatrix}. \quad /15/$$

где  $\beta_1$  и  $\beta_2$  - вероятности переворота спина на левой и правой сторонах ФП /обратная матрица равна  $T_2 = \vec{T}_2^{-1}$  /; 3/ модель сквозных отверстий

$$T_3 = \begin{pmatrix} (1 - \gamma) r + \gamma & 0 \\ 0 & \gamma \end{pmatrix}, \quad /16/$$

где  $\gamma$  - доля площади отверстий.

Матрицы /14-16/ можно объединить в следующей компактной форме:

$$\vec{T} = [(1 - \alpha) \vec{T}_2 + \alpha \vec{T}_2^x] (1 - \gamma) + \gamma I, \quad /17/$$

где  $I$  - единичная  $2 \times 2$  матрица, а матрица  $\vec{T}_2^x$  получается перестановкой в  $\vec{T}_2$  элементов вдоль обеих диагоналей. Интегральные поляризационные параметры для объединенной матрицы следующие:

$$\vec{T}_0 = \vec{T}_0 = \frac{1}{2} [(1 - \gamma) r + 2\gamma], \quad /18/$$

$$\vec{P} = \frac{(1 - 2\alpha)(1 - 2\beta_2)(1 - \gamma)r}{(1 - \gamma)r + 2\gamma}, \quad /19/$$

$$\vec{P} = \frac{(1 - 2\alpha)(1 - 2\beta_1)(1 - \gamma)r}{(1 - \gamma)r + 2\gamma}, \quad /20/$$

$$\vec{S} = \vec{S} = \frac{(1 - 2\beta_2)(1 - 2\beta_1)(1 - \gamma)r + 2\gamma}{(1 - \gamma)r + 2\gamma}. \quad /21/$$

В этой системе из четырех уравнений содержится пять неизвестных параметров  $\alpha$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ,  $\gamma$  и  $r$ . Если определить один из них независимым способом, то остальные могут быть найдены из /18-21/. Например, площадь отверстий в ФП можно определить с помощью газовых экспериментов с использованием ядерных фильтров из лавсановой пленки, в которой калиброванные отверстия в точно известном количестве созданы тяжелыми ионами. Другая возможность заключается в теоретической оценке поглощения. Корректность этой оценки можно проверить на ядерных фильтрах в той же геометрии опыта с УХН, что и для ФП. Варьируя плотность отверстий, вплоть до их отсутствия, можно проверить соотношение /18/.

Определение параметров моделей, а также возможное обнаружение других механизмов деполяризации позволит целенаправленно совершенствовать технологию изготовления ФП. Предлагаемая методика может оказаться полезной для изучения влияния различных внешних факторов на магнитные свойства тонких пленок.

### *Литература*

1. Altarev I.S. et al. Phys.Lett., 1981, 102B, p.13.
2. Pendlebury J.M. et al. Phys.Lett., 1984, 136B, p.327.

3. Егоров А.И. и др. ЯФ, 1974, 19, с.300.
4. Абов Ю.Г. и др. Поляризованные медленные нейтроны. Атомиздат, М., 1966.
5. Таран Ю.В. ОИЯИ, РЗ-9307, Дубна, 1975.
6. Herdin R. et al. Nucl.Instr. and Meth., 1978, 148, p.353.
7. Степанов А.В. и др. Краткие сообщения по физике, 1977, 9, с.37; В кн.: Нейтронная физика. Материалы 6-й Всесоюзной конференции по нейтронной физике /Киев, 1983/. ЦНИИАтоминформ, М., 1984, т.4, с.32.
8. Игнатович В.К. Письма в ЖЭТФ, 1978, 28, с.311.
9. Лобашов В.М., Серебров А.В. В кн.: III Международная школа по нейтронной физике. ОИЯИ, ДЗ-11787, Дубна, 1978, с.225.
10. Steyerl A. Там же, с.209.
11. Покотилковский Ю.Н. ОИЯИ, РЗ-11833, Дубна, 1978.
12. Игнатович В.К., Таран Ю.В. ОИЯИ, РЗ-83-180, Дубна, 1983.
13. Таран Ю.В. Авторское свидетельство СССР № 1091724 от 8.01.84. ОИ, 1985, № 4, с.213.
14. Игнатович В.К., Таран Ю.В. ОИЯИ, РЗ-82-440, Дубна, 1982.
15. Игнатович В.К., Таран Ю.В. В кн.: Нейтронная физика. Материалы 6-й Всесоюзной конференции по нейтронной физике /Киев, 1983/. ЦНИИАтоминформ, М., 1984, т.4, с.17.
16. Таран Ю.В. Авторское свидетельство СССР № 1097078 от 8.02.84. ОИ, 1985, № 17, с.201.
17. Luschnikov V.I., Taran Yu.V. Nucl.Instr. and Meth., 1984, 228, p.159.
18. Луциков В.И., Таран Ю.В. ОИЯИ, РЗ-85-429, Дубна, 1985.

Рукопись поступила 28 октября 1985 года.