

УДК 538.9

ПРИМЕНЕНИЕ ОПОРНОГО СЛОЯ Gd ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МАГНИТНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ НАНОГЕТЕРОСТРУКТУР МЕТОДОМ НЕЙТРОННОЙ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ

© 2021 г. Е. С. Никова^{a, b, *}, Ю. А. Саламатов^a, Е. А. Кравцов^{a, b}, В. В. Устинов^{a, b}

^aИнститут физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, 620108 Россия

^bУральский федеральный университет, Екатеринбург, 620002 Россия

*e-mail: e.nikova@mail.ru

Поступила в редакцию 22.01.2021 г.

После доработки 25.03.2021 г.

Принята к публикации 28.03.2021 г.

Представлены результаты использования резонансного рассеяния нейтронов на ядрах Gd для экспериментального определения комплексного коэффициента отражения металлических образцов с ферромагнитными слоями методом поляризационной нейтронной рефлектометрии. На поверхность исследуемых образцов был нанесен опорный слой Gd, для которого длина рассеяния медленных нейтронов существенно зависит от энергии. Измеряя коэффициент зеркального отражения нейтронов для трех различных углов падения, можно решить фазовую проблему нейтронной рефлектометрии и определить модуль и фазу комплексного коэффициента отражения от неизвестной части структуры магнитного образца.

Ключевые слова: нейтронная рефлектометрия, многослойные наноструктуры, нейтронные резонансы, опорный слой, фазовая проблема.

DOI: 10.31857/S1028096021090120

ВВЕДЕНИЕ

Нейтронная рефлектометрия – метод исследования плоских границ раздела сред, в основе которого лежит зеркальное отражение пучка низкоэнергетических нейтронов (10^{-1} эВ), падающих под малыми углами скольжения ($\sim 10^{-3}$ – 10^{-2} рад) к поверхности пленки. Для исследования магнитного состояния вещества применяют рефлектометрию поляризованных нейтронов, так как анализ поляризации отраженных нейтронов дает информацию о распределении магнитных моментов по глубине пленки.

Для решения фазовой проблемы в ряде частных случаев был предложен метод опорного слоя, заключающийся в нанесении на исследуемую систему слоя с известными характеристиками. Данный метод был успешно применен для изучения немагнитных систем, поскольку в качестве опорного слоя использовался ферромагнитный металл и изменялись величина и направление его намагниченности [1–3] либо использовались поляризованные нейтроны [4, 5]. Но к исследованию магнитных структур такой подход применить нельзя, так как магнитное поле изменит характеристики и неизвестной части образца. Также существует метод, основанный на восстановлении

фазы с помощью логарифмического дисперсионного соотношения [6]. Однако данный способ требует априорной информации о расположении нулей комплексного коэффициента отражения. Как правило, оно неизвестно, и необходимо применять дополнительные итерационные процедуры для их поиска.

В [7] было предложено использовать в качестве опорного слоя гадолиний. Этот элемент характеризуется выраженным резонансным взаимодействием ядер двух изотопов Gd^{155} и Gd^{157} с тепловыми нейтронами [8], что приводит к зависимости плотности длины рассеяния от длины волны нейтронов (или к зависимости от угла падения пучка для времяпролетных установок). Хотя резонансное рассеяние широко используется в рентгеновской рефлектометрии, в нейтронной оно практически не применяется [9–11]. Связано это с тем, что длины рассеяния медленных нейтронов для большинства изотопов не зависят от их энергии.

Измерение трех рефлектометрических кривых при различных длинах волн (или различных углах падения на времяпролетных рефлектометрах) дает возможность рассчитать комплексный коэффициент отражения исследуемой части образца, если известны характеристики опорного слоя.

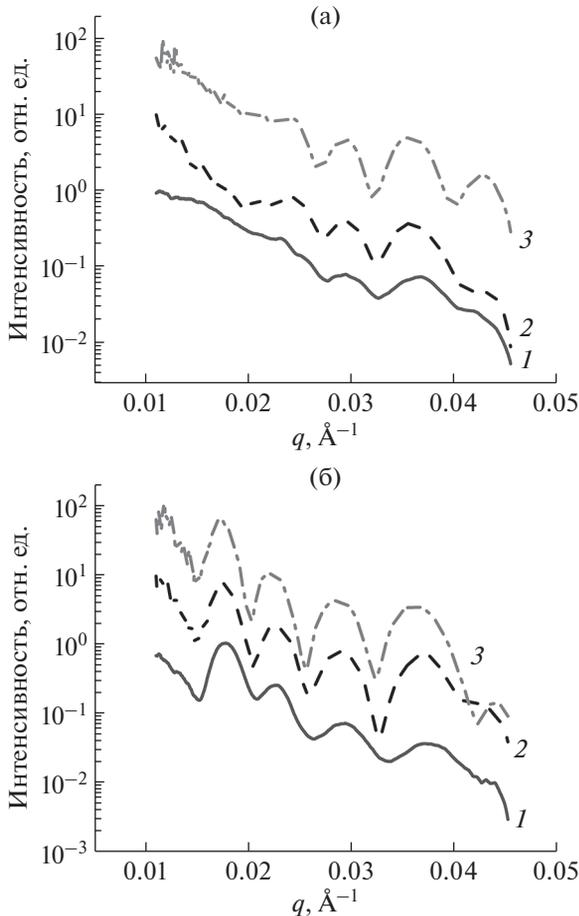


Рис. 1. Рефлектометрические кривые антиферромагнитной пленки $\text{Si}/\text{Cr}(100 \text{ \AA})//[\text{Fe}(80 \text{ \AA})/\text{Cr}(10.5 \text{ \AA})]_8/\text{Cr}(20 \text{ \AA})/\text{Gd}(100 \text{ \AA})/\text{V}(50 \text{ \AA})$ для поляризации “++” (а) и “- -” (б) при трех углах падения: 3.98 (1); 6.12 (2); 8.055 мрад (3).

Метод был апробирован на модельных численных расчетах и на экспериментальных данных для немагнитных образцов, полученных на времяпролетном рефлектометре РЕФЛЕКС реактора ИБР-2 (ОИЯИ, Дубна) [12].

В настоящей работе приведены результаты экспериментального определения модуля и фазы комплексного коэффициента отражения пленки-сверхрешетки с магнитными слоями, упорядочение которых слабо неколлинеарное, близкое к антиферромагнитному.

МЕТОДИКА

Представив исследуемый образец как двухслойную систему, в которой на слое G с неизвестной структурой расположен известный опорный слой H , полную оптическую матрицу такой системы можно описать уравнением $\mathbf{M} = \mathbf{G} \times \mathbf{H}$.

Коэффициенты прохождения t и отражения r такого образца определяются соотношением:

$$\begin{pmatrix} t \\ 0 \end{pmatrix} = \mathbf{M} \begin{pmatrix} 1 \\ r \end{pmatrix} = \mathbf{G} \times \mathbf{H} \begin{pmatrix} 1 \\ r \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Коэффициент отражения r_g неизвестной части образца представляет собой точку на окружности, которая лежит в комплексной плоскости, на окружности радиуса ρ с центром γ [13]:

$$\gamma = \frac{Rh_{22}h_{12}^* - h_{21}h_{11}^*}{Rh_{12}h_{12}^* - h_{11}h_{11}^*}, \quad (2)$$

$$\rho = \sqrt{R} \frac{|h_{11}h_{22} - h_{12}h_{21}|}{Rh_{12}h_{12}^* - h_{11}h_{11}^*}. \quad (3)$$

В данном случае h_{ij} – элементы матрицы \mathbf{H} , а R – амплитуда коэффициента отражения полной системы.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Образец для исследования $\text{Si}/\text{Cr}(100 \text{ \AA})//[\text{Fe}(80 \text{ \AA})/\text{Cr}(10.5 \text{ \AA})]_8/\text{Cr}(20 \text{ \AA})/\text{Gd}(100 \text{ \AA})/\text{V}(50 \text{ \AA})$ был синтезирован методом высоковакуумного магнетронного распыления на монокристаллической подложке $\text{Si}(001)$ при комнатной температуре на установке ULVAC (ИФМ УрО РАН, Екатеринбург). Спектры отражения поляризованных нейтронов были измерены на времяпролетном рефлектометре РЕФЛЕКС импульсного реактора ИБР-2 (ОИЯИ, Дубна) [14]. Перед измерениями образец был намагничен до насыщения, затем внешнее поле было уменьшено до ведущего поля, в котором и проводились эксперименты. В этом случае не должно достигаться строго антиферромагнитное упорядочение моментов слоев, а должно сформироваться слабо неколлинеарное состояние с углом между моментами $\sim 120^\circ$. Три рефлектометрические кривые были получены для трех разных углов падения: 4, 6, 8 мрад. Рефлектометрические кривые для поляризации со знаками “++” и “- -” представлены на рис. 1. Рефлектометрические кривые для поляризации со знаками “+ -” и “- +” – на рис. 2.

По рефлектометрическим данным, используя энергетическую зависимость плотности длины рассеяния Gd [15], была рассчитана оптическая матрица Gd/V в каждой точке Q -пространства. Далее были рассчитаны модули и фазы комплексного коэффициента отражения для исследуемой части образца $\text{Si}/\text{Cr}(100 \text{ \AA})//[\text{Fe}(80 \text{ \AA})/\text{Cr}(10.5 \text{ \AA})]_8/\text{Cr}(20 \text{ \AA})$ для поляризации всех знаков. Модули представлены на рис. 3, фаза коэффициента отражения – на рис. 4.

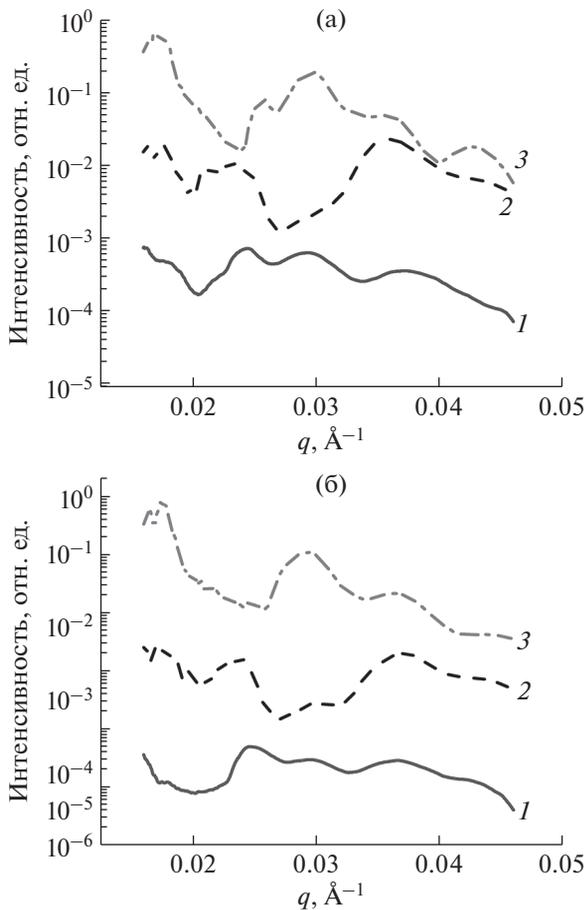


Рис. 2. Рефлектометрические кривые антиферромагнитной пленки Si//Cr(100 Å)//[Fe(80 Å)/Cr(10.5 Å)]₈/Cr(20 Å)/Gd(100 Å)/V(50 Å) для поляризации “-+” (а) и “-+” (б) при трех углах падения: 3.98 (1); 6.12 (2); 8.055 мрад (3).

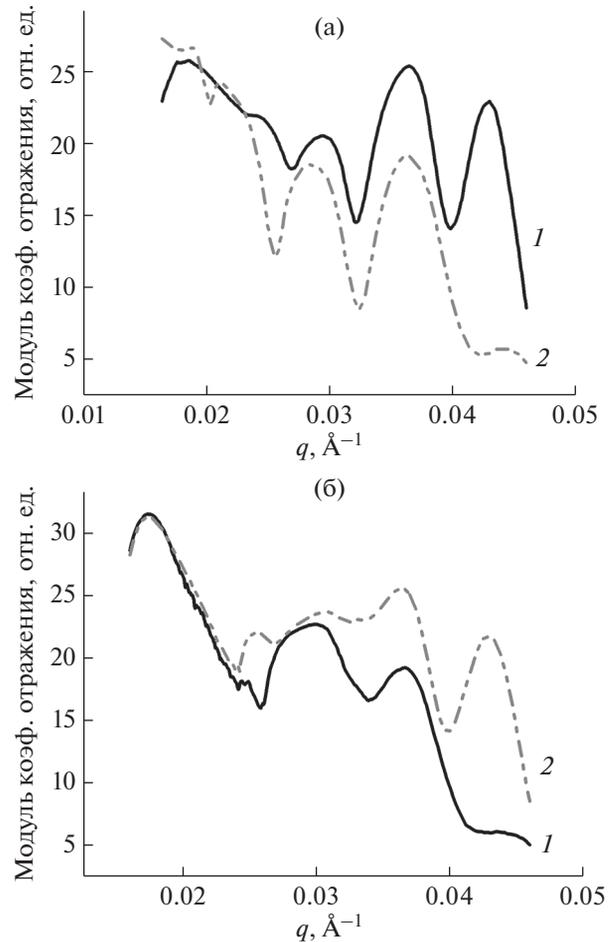


Рис. 3. Модуль коэффициента отражения от исследуемой части антиферромагнитной пленки Si//Cr(100 Å)//[Fe(80 Å)/Cr(10.5 Å)]₈/Cr(20 Å) для поляризации: а – “+–” (1), “--” (2); б – “-+” (1), “+-” (2).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведены первые экспериментальные результаты по апробации метода определения комплексного коэффициента отражения поляризованных нейтронов с использованием опорного слоя Gd для сверхрешетки со слабо неколлинеарным упорядочением моментов магнитных слоев. Показано, что рефлектометрические кривые имеют различный вид в зависимости от угла падения. Предложенный подход позволяет по этим данным восстановить модуль и фазу коэффициента отражения для поляризации разных знаков. Фазы коэффициента отражения совпали для всех знаков поляризации, на кривых не наблюдаются осцилляции или иные особенности. Это, по-видимому, связано с тем, что образец имеет поликристаллическую структуру. Фазы лучей, отраженных от различных кристаллитов, усредняются, что приводит к однородному слабому изменению фазы в зависимости от q и исчезновению особенностей,

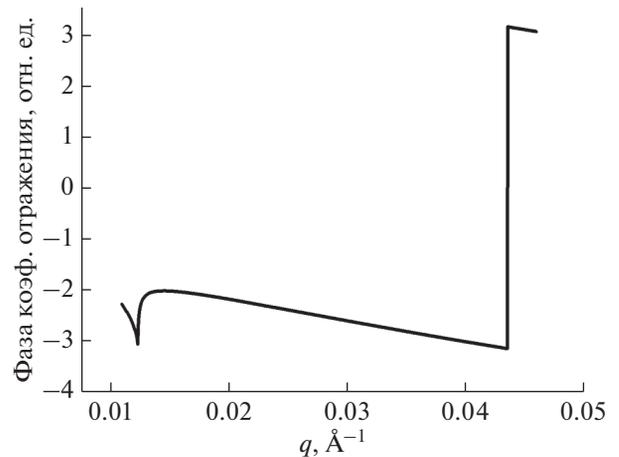


Рис. 4. Фаза коэффициента отражения от исследуемой части антиферромагнитной пленки Si//Cr(100 Å)//[Fe(80 Å)/Cr(10.5 Å)]₈/Cr(20 Å).

связанных с поляризацией. Дальнейшее развитие предложенного метода позволит добиться решения фазовой проблемы нейтронной рефлектометрии, в том числе применительно к магнитным системам.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме “Спин” (№ АААА-А18-118020290104-2) при частичной поддержке РФФИ (проект № 19-02-00674).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Majkrzak C.F., Berk N.F.* // Phys. Rev. B. 1995. V. 52. P. 10827.
2. *Majkrzak C.F., Berk N.F.* // Phys. Rev. B. 1998. V. 58. P. 15416.
3. *Majkrzak C.F., Berk N.F., Silin V., Meuse C.W.* // Physica B. 2000. V. 283. P. 248.
4. *De Haan V.O., van Well A.A., Adenwalla S., Felcher G.P.* // Phys. Rev. B. 1995. V. 52. P. 10831.
5. *Lipperheide R., Weber M., Leeb H.* // Phys. Rev. B. 2000. V. 283. P. 242.
6. *Klibanov M.V., Sacks P.E.* // J. Math. Phys. 1992. № 33. P. 3813.
7. *Salamatov Yu.A., Kravtsov E.A.* // J. Surf. Invest.: X-ray, Synchrotron Neutron Tech. 2016. № 10. P. 1169.
8. *Lynn J.E., Seeger P.A.* // Atomic Data and Nuclear Data Tables. 1990. V. 44. Iss. 2. P. 191.
9. *Brockhouse B.N.* // Canad. J. Phys. 1953. V. 31. P. 432.
10. *Peterson S.W., Smit H.G.* // Phys. Rev. Lett. 1961. V. 6. P. 7.
11. *Smit H.G., Peterson S.W.* // J. Physique. 1964. V. 25. P. 615.
12. *Nikova E.S., Salamatov Yu.A., Kravtsov E.A., Ustinov V.V.* // Superlattices and Microstructures. 2017. № 109. P. 201.
13. *De Haan V.O., van Well A.A., Sacks P.E., Adenwalla S., Felcher G.P.* // Physica B. 1996. V. 221. P. 524.
14. <http://flnph.jinr.ru/ru/facilities/ibr-2/instruments/reflex>
15. *Nikova E.S., Salamatov Yu.A., Kravtsov E.A., Bodnarchuk V.I., Ustinov V.V.* // Physica B. 2019. V. 552. P. 58.

Application of Gd Reference Layer for the Study of Magnetic Metallic Nanostructures by Neutron Reflectometry

E. S. Nikova^{1,2,*}, Yu. A. Salamatov¹, E. A. Kravtsov^{1,2}, and V. V. Ustinov^{1,2}

¹Miheev Institute of Metal Physics UB RAS, Ekaterinburg, 620108 Russia

²Ural Federal University, Ekaterinburg, 620002 Russia

*e-mail: e.nikova@mail.ru

The results of the use of resonant neutron scattering by Gd atoms for the experimental determination of the complex reflection coefficient of metallic samples with ferromagnetic layers by neutron reflectometry are presented. A reference Gd layer was deposited on the surface of the samples under study, for which the scattering length of slow neutrons substantially depended on the energy. By measuring the specular reflection coefficient of neutrons for three different angles of incidence, one can solve the phase problem of neutron reflectometry and determine the modulus and phase of the complex reflection coefficient for an unknown part of the structure of a magnetic sample.

Keywords: neutron reflectometry, multilayer nanostructures, neutron resonances, reference layer, phase problem.