

P14-2007-109

В. Л. Аксенов^{1,2}, Ю. В. Никитенко¹, В. В. Проглядо¹,
Ю. Н. Хайдуков^{1,*}, В. Н. Гаврилов³, Э. Райтман³,
Л. Боттян⁴, Д. Л. Надь⁴

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ
ВОЛНЫ НА МАГНИТНОЕ УПОРЯДОЧЕНИЕ
В СЛОИСТОЙ СТРУКТУРЕ $20 \times [\text{Fe}(20 \text{ \AA})/\text{Cr}(12 \text{ \AA})]/\text{MgO}$

Направлено в журнал «Кристаллография»

¹Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

²Российский научный центр «Курчатовский институт», Москва

³Физико-энергетический институт, Рига

⁴Исследовательский институт физики ядра и частиц, Будапешт

*E-mail: khaiduk@nf.jinr.ru

Аксенов В.Л. и др.

P14-2007-109

Исследование влияния ультразвуковой волны на магнитное упорядочение в слоистой структуре $20 \times [\text{Fe}(20 \text{ \AA})/\text{Cr}(12 \text{ \AA})]/\text{MgO}$

Методом рефлектометрии поляризованных нейтронов исследована структура $20 \times [\text{Fe}(20 \text{ \AA})/\text{Cr}(12 \text{ \AA})]/\text{MgO}$, возбуждаемая ультразвуковой волной. Обнаружено, что в магнитных полях малой напряженности происходит колебание магнитных доменов и уменьшение их эффективного размера. В магнитных полях вблизи насыщения в слоистой структуре образуется магнитная решетка, межплоскостные расстояния в которой изменяются с ростом напряженности магнитного поля и при возбуждении структуры звуковой волной.

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

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2007

Aksenov V. L. et al.

P14-2007-109

Investigation of Ultrasonic Wave Influence on Magnetic Alignment in Layered Structure $20 \times [\text{Fe}(20 \text{ \AA})/\text{Cr}(12 \text{ \AA})]/\text{MgO}$

The layered structure $20 \times [\text{Fe}(20 \text{ \AA})/\text{Cr}(12 \text{ \AA})]/\text{MgO}$, excited by ultrasonic wave, was investigated using polarized neutron reflectometry. Magnetic domains vibrations and reduction of their effective size in magnetic field of small strength were observed. In magnetic field close to saturation magnetic lattice is formed in the layered structure. Interplane distance of the lattice changes with increase of magnetic field strength as well as with ultrasonic excitation of the structure.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2007

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что в периодической слоистой структуре, состоящей из магнитных слоев (Fe, Co), разделенных немагнитными (Cu, Cr, V) прослойками определенной толщины, существует антиферромагнитное упорядочение в глубь структуры [1]. Так, например, в исследуемой структуре $20 \times [\text{Fe}(20 \text{ \AA})/\text{Cr}(12 \text{ \AA})]/\text{MgO}$ [2] антиферромагнитное упорядочение реализуется при толщине слоя хрома 12 Å. Магнитным упорядочением можно управлять, изменяя величину обменного взаимодействия как прямого, между соседними атомами, так и косвенного, через немагнитную прослойку. Так, в [3] для этого слои ванадия насыщают водородом, изменяя тем самым их толщину и, как следствие, величину обменного взаимодействия между магнитными слоями. Отметим, что величина обменного взаимодействия в слоистой структуре также меняется при переходе немагнитных слоев в сверхпроводящее состояние [4].

Еще одним способом воздействия на магнитную систему является возбуждение в структуре звуковой волны. Звуковая волна создает зависящий от времени градиент давления. Это приводит к изменению толщины магнитного и немагнитного слоев. В результате соответственно изменяется величина прямого и косвенного обменного взаимодействия. Наряду с периодическим во времени изменением величины обменного взаимодействия возможно изменение его среднего во времени значения. Последнее может быть связано с несимметричностью относительно нуля значения давления, а также с несимметричностью реакции магнитной системы на приложенное давление. Отметим в связи с этим известное явление колебания и дрейфового движения доменной границы под действием звуковой волны [5–10]. В работе [11] уже сообщалось об исследованиях отражения нейтронов от возбуждаемой тангенциальной звуковой волной структуры $26 \times [^{57}\text{Fe}(16 \text{ \AA})/\text{Cr}(17 \text{ \AA})]/\text{Cr}(500 \text{ \AA})/\text{стекло}$, в которой существовало ферромагнитное упорядочение магнитных моментов слоев. С увеличением частоты звука (использовались частоты 30, 90 и 150 МГц) наблюдалось уширение брэгговского пика первого порядка.

В данной работе выполнены исследования отражения нейтронов в зависимости от уровня мощности и частоты звука, а также при различных значениях напряженности магнитного поля. Наблюденно изменение интенсивности рас-

сеянных нейтронов, которое связывается с изменением размера магнитных неоднородностей и неупругим рассеянием на магнитных возбуждениях.

1. МЕТОДИКА И ТЕХНИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Исследуемая слоистая структура $20 \times [\text{Fe}(20 \text{ \AA})/\text{Cr}(12 \text{ \AA})]$ была изготовлена в Католическом университете г. Левена (Бельгия) методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложке из $\text{MgO}(001)$ размером $15 \times 15 \times 1$ мм. Магнитометрические измерения показали наличие в структуре антиферромагнитной фазы в магнитных полях от нуля до насыщения (~ 9 кЭ).

Пьезоэлемент из ниобата лития LiNbO_3 был установлен на подложке, так что в структуре возбуждалась продольная звуковая волна с волновым вектором, направленным перпендикулярно границам раздела (параллельно переданному моменту зеркально отражаемых нейтронов). Возбуждаемые ультразвуковые волны имели частоту 58,5 и 175,5 МГц (первая и третья гармоники колебаний). При скоростях ультразвука в железе и хrome $\sim 5 \cdot 10^3$ м/с длина волны для указанных частот составляет 90 и 30 мкм.

Нейтронные измерения были проведены на спектрометре РЕМУР [12], расположенном на импульсном реакторе ИБР-2 (Дубна). Измерения проводились в интервале длин волн нейтронов $\lambda = 1,5 - 10 \text{ \AA}$. Использовался полный поляризационный анализ и позиционно-чувствительное детектирование нейтронов (рис. 1). Это позволило измерить интенсивности зеркального отражения $I^{\mu\nu}(Q_z)$ в диапазоне изменения перпендикулярной компоненты переданного момента $Q_z = 0,02 - 0,25 \text{ \AA}^{-1}$ и диффузного рассеяния $I^{\mu\nu}(Q_x)$ в диапазоне изменения продольной компоненты момента $Q_x = (10^{-4} - 10^{-2})Q_z$. Здесь символами « μ » и « ν » обозначается знак проекции спина нейтрона на

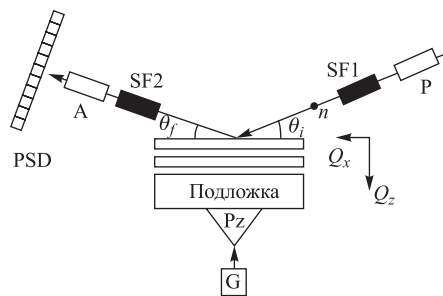


Рис. 1. Схема эксперимента: P — поляризатор; SF1 — спин-флиппер 1; Pz — пьезоэлемент; G — высокочастотный генератор электрических колебаний; SF2 — спин-флиппер 2; A — анализатор; PSD — позиционно-чувствительный детектор

направление внешнего поля до и после рассеяния соответственно. Наличие двух спин-флипперов позволяет измерить кривые рассеяния нейтронов с переверотом спина (спин-флипп) I^{+-} и I^{-+} и без переверота спина нейтрона I^{++} и I^{--} .

Магнитное поле на образце было направлено параллельно плоскости образца и в направлении легкой оси намагничивания слоев железа (Fe[010] или Fe[100]).

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 приведены интенсивности зеркально отраженных нейтронов $I^{\mu\nu}(Q_z)$ для четырех спиновых состояний («++», «+-», «-+» и «--») в магнитном поле $H = 20$ Э. Видны брэгговские пики $Q_{\text{стр}} = 0,2 \text{ \AA}^{-1}$ и $Q_{\text{маг}} = 0,1 \text{ \AA}^{-1}$, связанные с отражением от структурной и магнитных решеток с периодами $D_{\text{стр}} = 32 \text{ \AA}$ и $D_{\text{маг}} = 2 D_{\text{стр}}$ соответственно. Проведенный расчет показывает, что средний магнитный момент в соседних слоях железа по абсолютной величине составляет 16 ± 1 кЭ и развернут на угол $135 \pm 5^\circ$

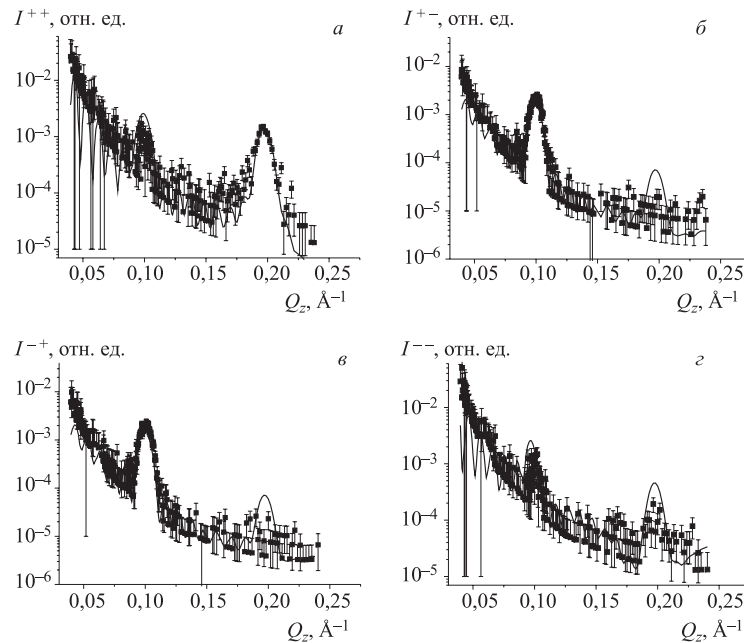


Рис. 2. Интенсивность зеркально отраженных нейтронов в различных измерительных каналах при $H = 20$ Э (точки). Сплошной линией показан расчет

по отношению друг к другу. Среднеквадратичное значение амплитуды шероховатостей в периодической структуре составляло $(7 \pm 2) \text{ \AA}$.

Поскольку пик вблизи Q_{mag} более интенсивен и чувствителен к изменению намагниченности системы, измерения в малых магнитных полях (много меньше поля насыщения) проводились вблизи Q_{mag} . Так, на рис. 3 представлены коэффициенты зеркального отражения от структуры, возбужденной ультразвуковой волной с частотой $f = 58,5 \text{ МГц}$ при силе тока генератора $J = 30 \text{ мкА}$. Видно, что с включением ультразвука происходит изменение положений брэгговских максимумов в «++» и «--» каналах на $\Delta Q_z = \pm 3,51 \cdot 10^{-3} \text{ \AA}^{-1}$ соответственно. Такое изменение может быть объяснено процессами неупругого рассеяния на магнитных возбуждениях. Сдвиг максимума в данном случае связывается с процессом поглощения или испускания нейтроном кванта магнитного возбуждения. Аналогичные измерения при 4 кЭ не обнаружили сильного изменения кривых зеркального отраже-

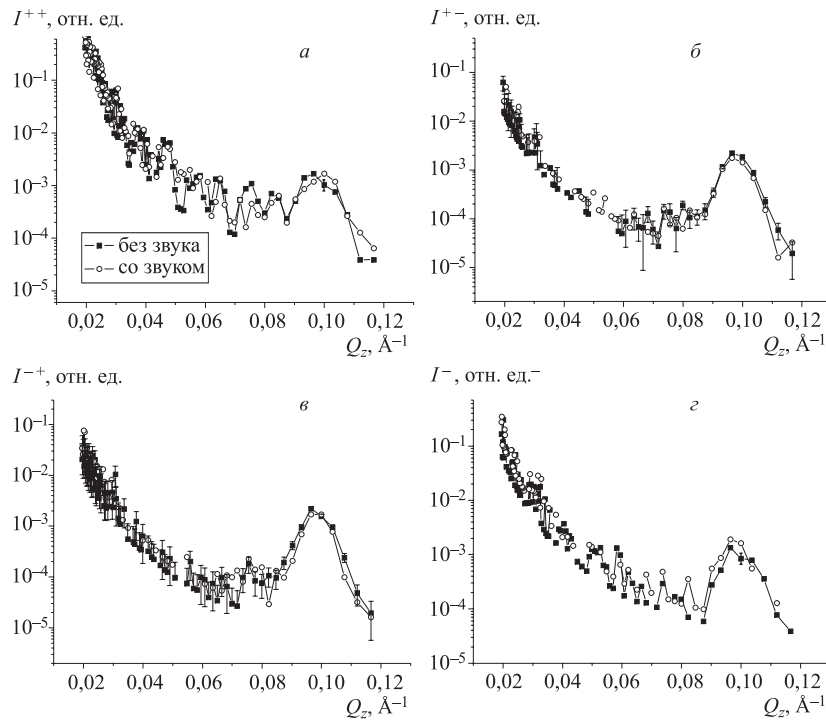


Рис. 3. Кривые зеркального отражения при $H = 20 \text{ Э}$ без ультразвука (квадраты) и с ультразвуком (кружки) ($f = 58,5 \text{ МГц}$, $J = 30 \text{ мкА}$)

ния. Поскольку при увеличении напряженности магнитного поля происходит постепенное исчезновение доменов, можно предположить, что последние и являются источником магнитных возбуждений.

На рис. 4 приведены зависимости интенсивности диффузного рассеяния $I(Q_x)$ с переворотом спина $I_{sf}(Q_x) = I^{+-} + I^{-+}$ (а) и без переворота $I_{nsf}(Q_x) = I^{++} + I^{--}$ (б), измеренные при $H = 20$ Э без ультразвука. Интенсивность $I_{sf}(Q_x)$ больше в 5 раз, чем $I_{nsf}(Q_x)$, и падает быстрее с увеличением Q_x . Это говорит о том, что намагниченность в доменах направлена преимущественно перпендикулярно внешнему полю. Размер домена ξ может быть оценен из скорости изменения кривой $I_{sf}(Q_x)$ при малых Q_x . В данном диапазоне интенсивность была аппроксимирована функцией $A\xi^2/[1 + (Q_x\xi)^2]^{3/2}$ [13], где константа A зависит от параметров экспери-

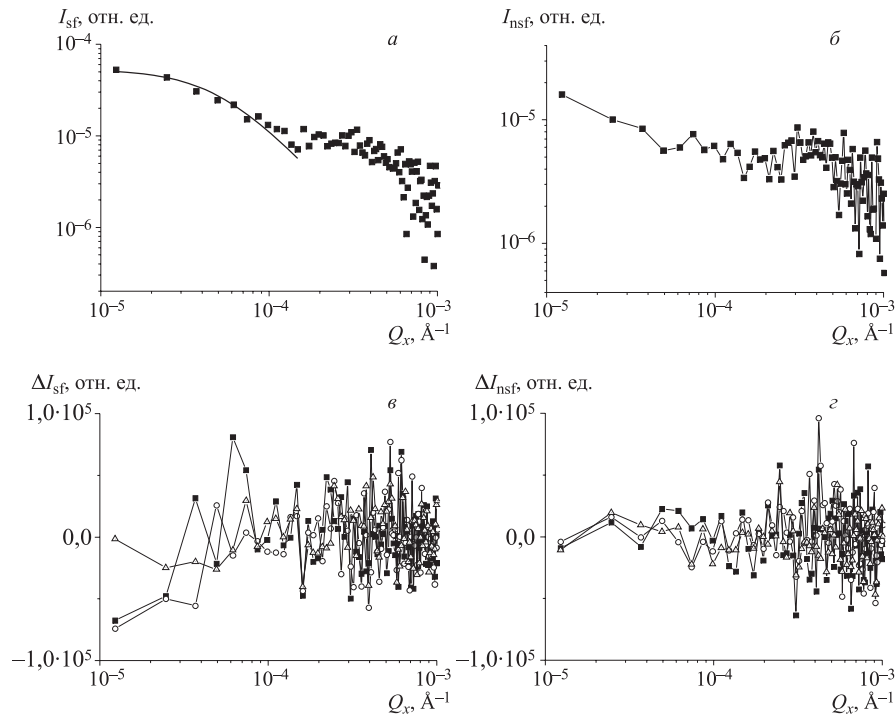


Рис. 4. Интенсивность спин-флипового (а) и не спин-флипового (б) диффузного рассеяния нейтронов при $H = 20$ Э без ультразвука. Изменение интенсивности I_{sf} (в) и I_{nsf} (г) при включении ультразвука с частотой $f = 175,5$ МГц при силе тока $J = 5$ (квадраты), 10 (кружки) и 20 мкА (треугольники)

мента и свойств образца. Подгонка данных дает значение $\xi = 2 \pm 0,03$ мкм. На рис. 4, *a*, *z* показано изменение кривых диффузного рассеяния $I_{sf}(Q_x)$ и $I_{nsf}(Q_x)$ при включении ультразвука ($\Delta I \equiv I_{звук} - I_{без}$). Сильное изменение (порядка 4–10 %) наблюдается в спин-флиповых каналах. Характер изменения кривых I_{sf} при токе $J = 5$ и 10 мкА может быть интерпретирован как уменьшение размера домена до $\xi = 1,5$ и $1,7$ мкм соответственно. Вместе с тем поведение кривой при $J = 20$ мкА не может быть описано только изменением размера домена.

Изменение кривых рассеяния $\Delta I_{sf}(Q_x)$ при возбуждении ультразвука различной частоты представлено на рис. 5. В магнитном поле $H = 20$ Э при частоте $f = 58,5$ МГц также наблюдается уменьшение интенсивности рассеяния в малых Q_x на 20 %, что может быть объяснено уменьшением размера домена. В большом поле $H = 4$ кЭ сильного изменения диффузного рассеяния не наблюдалось.

На рис. 6 представлены карты интенсивности в координатах «угол рассеяния (θ_f) – длина волны нейтрона (λ)» для «++» (*a*) и «--» (*b*) каналов рассеяния, измеренных в магнитном поле $H = 8$ кЭ без ультразвука. На рис. 6, *a* виден брэгговский пик $Q_{стр}$ в зеркальном отражении при $\theta_f = \theta_i = 27$ мрад и $\lambda = 1,7$ Å. Помимо этого пика наблюдался пик в незеркальном канале при $\theta_f = 34$ мрад и $\lambda = 3,4$ Å (см. рис. 6, *b*). Наличие таких пиков в незеркальном рассеянии может быть связано с когерентным рассеянием нейтронов на решетке, имеющей периоды D_x и D_z в плоскости образца и в направлении перпендикулярно границам раздела соответственно. Положение пика и его спиновое состояние изменялось при изменении магнитного

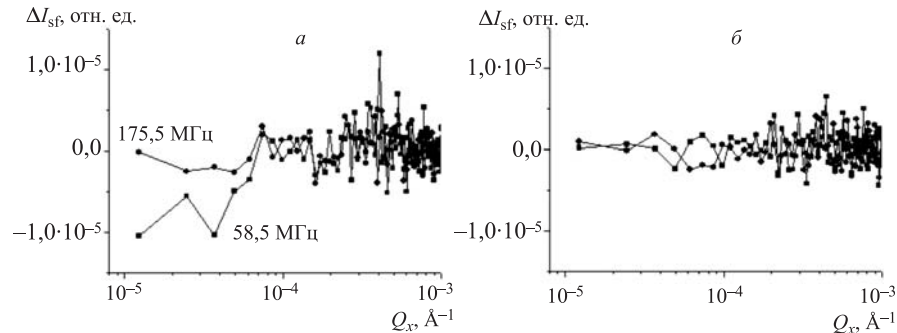


Рис. 5. Изменение интенсивности спин-флипового диффузного рассеяния $\Delta I_{sf}(Q_x)$ при включении ультразвука с частотами $f = 58,5$ (квадраты) и $175,5$ МГц (кружки) в магнитном поле $H = 0,02$ (*a*), 4 кЭ (*b*)

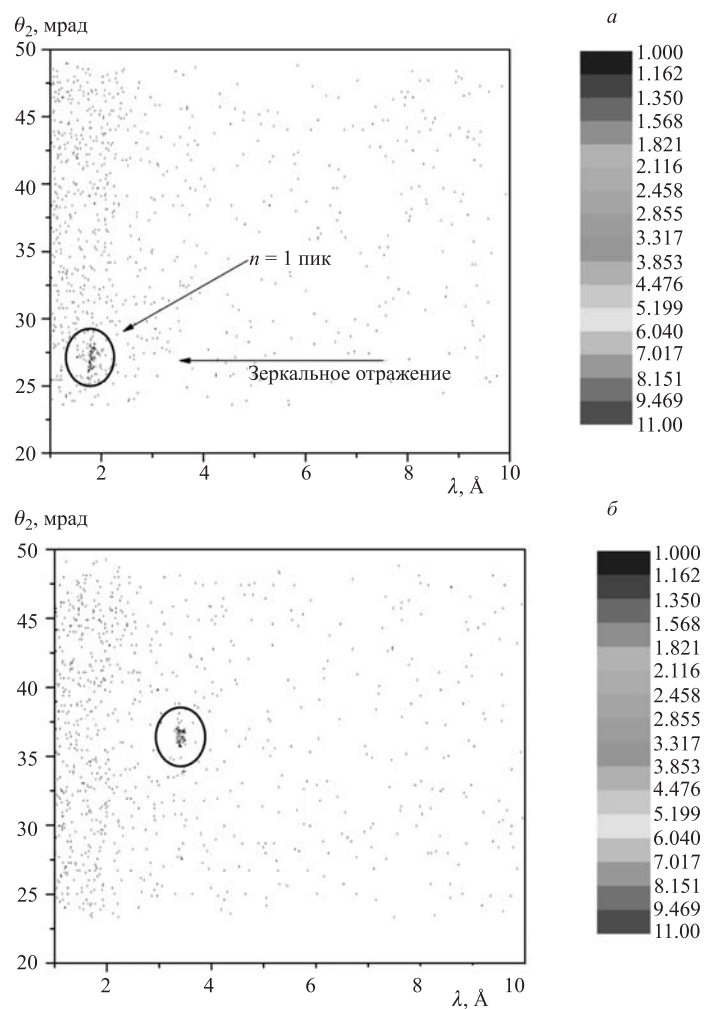


Рис. 6. Карты интенсивности рассеяния нейтронов для «++» (а) и «--» (б) каналов измерения при $H = 8$ кЭ без ультразвука

поля и с включением ультразвука (см. таблицу). Это указывает на то, что наблюдаемая решетка является магнитной. Данную магнитную решетку могут образовывать, например, магнитные шероховатости на границах раздела. Не исключено, что ее образование связано с доменами в слоях железа.

Положение и спиновое состояние пика в незеркальном канале при изменении внешнего поля и ультразвука

H , кЭ	Ультразвук	λ , Å	Спиновое состояние	D_x , мкм	D_z , Å
8	выкл	3,4	--	1,7	56
8	вкл	1,7	+-	0,8	28
14	выкл	5,4	-+	2,6	89
14	вкл	$8,5(N_z = 1)$	+-	4,2	140
14	вкл	$2,6(N_z = 3)$	+-	4,2	140

Запишем брэгговские соотношения для отражения нейтронов от решетки:

$$Q_z D_z = 2\pi N_z, \quad Q_x D_x = 2\pi N_x. \quad (1)$$

Выражение (1) с учетом геометрии эксперимента может быть переписано для плоскости рассеяния « $\theta_f - \lambda$ » как

$$\begin{aligned} \theta_f(\lambda) &= \frac{N_z}{D_z} \lambda - \theta_i, \quad N_z = 1, 2, \dots, \\ \theta_f(\lambda) &= \sqrt{\theta_i^2 - \frac{2N_x}{D_x} \lambda}, \quad N_x = 1, 2, \dots \end{aligned} \quad (2)$$

Систему уравнений (2) можно объединить в одно:

$$\theta_i - \theta_f = \frac{D_z}{D_x} \frac{2N_x}{N_z}. \quad (3)$$

Из (3) видно, что при фиксированных периодах D_z и D_x и углах скольжения θ_i и θ_f порядки отражения N_x и N_z связаны линейно. Из полученных уравнений в предположении, что $N_x = N_z = 1$, следует $D_z = 28$ Å и $D_x = 0,8$ мкм. Аналогичные расчеты для других полей также представлены в таблице. Из таблицы следует, что при увеличении поля происходит увеличение D_z и D_x . Поведение решетки с включением ультразвука зависит от приложенного внешнего поля: при $H = 8$ кЭ ультразвуковая волна уменьшает периоды D_x и D_z примерно в два раза; при $H = 14$ кЭ ультразвук увеличивает периоды в 1,6 раза. Отметим также, что размер D_x по порядку величины близок как к размеру доменов, так и к длине волны ультразвука.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненное исследование антиферромагнитно-упорядоченной Fe/Cr слоистой структуры показало, что при возбуждении колебаний ультразвукового

диапазона ($\sim 10^2$ МГц) магнитное состояние структуры изменяется. При сравнительно небольших значениях напряженности магнитного поля H возбуждение их структуры приводит к колебанию магнитных доменов и уменьшению эффективного размера. В магнитном поле вблизи насыщения в структуре существует магнитная решетка, образованная, по-видимому, магнитными шероховатостями вблизи границ раздела. Изменение магнитного поля и возбуждение ультразвуковой волны ведет к изменению периодов магнитной решетки.

В свете полученных результатов выполненные исследования представляются полезными в связи с поисками новых способов управления магнитными носителями информации, а также для разработки электронных элементов на основе акустических волн. Чтобы установить природу образования магнитной решетки, представляется целесообразным продолжить эти исследования.

Авторы выражают благодарность М. Майору и Ф. Танцико за предоставленный образец и помощь в измерении, а также В. К. Игнатовичу за полезное обсуждение работы.

Работа была выполнена при частичной поддержке проекта МТА-DUB/06.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bruno P. // PRB. 1995. V. 52(1). P. 52.
2. Nagy D. L. et al. // Phys. Rev. Lett. 2002. V. 88. P. 157202.
3. Laberge D. et al. // JMMM. 1999. V. 192. P. 238.
4. Sa de Melo C. A. R. // Phys. Rev. B. 2000. V. 62. P. 12303.
5. Барьяхтар В. Г., Иванов Б. А. // ФММ. 1975. Т. 39, вып. 4. С. 478.
6. Луговой А. А., Туров Е. А. // ФТТ. 1982. Т. 24, вып. 4. С. 1145.
7. Денисов С. И. // ФТТ. 1989. Т. 31, вып. 11. С. 270.
8. Горобец Ю. И., Денисов С. И. // УФЖ. 1990. Т. 35, вып. 2. С. 271.
9. Герасимчук В. С., Шитов А. А. // ФТТ. 2001. Т. 43, вып. 10. С. 184.
10. Герасимчук В. С., Шитов А. А. // ФТТ. 2003. Т. 45, вып. 1. С. 119.
11. Aksenov V. L. et al. // Latvian J. Phys. Tech. Sci. 2004. V. 3. P. 55.
12. Аксенов В. Л. и др. Препринт ОИЯИ Д13-2004-47. Дубна, 2004.
13. Salditt T. et al. // Phys. Rev. B. 1995. V. 51. P. 5617.

Получено 17 июля 2007 г.

Редактор *Е. В. Сабеева*

Подписано в печать 20.11.2007.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,75. Уч.-изд. л. 0,94. Тираж 300 экз. Заказ № 55967.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/