

Комплементарное применение нейтронного и рентгеновского синхротронного рассеяния для определения магнитной микроструктуры обменно-связанных слоистых наногетероструктур

© Е.А. Кравцов^{1,2}, В.В. Устинов¹

¹ Институт физики металлов УрО РАН,
Екатеринбург, Россия

² Уральский государственный технический университет (УПИ),
Екатеринбург, Россия

E-mail: kravtsov@imp.uran.ru

Рассматривается комплементарное применение нейтронных и рентгеновских методик для исследования неоднородной магнитной микроструктуры, характерной для обменно-связанных наногетероструктур, образованных чередующимися слоями ферромагнитных и антиферромагнитных металлов. Показано, что изменение магнитных моментов как по величине, так и по направлению внутри ферромагнитных слоев может быть определено путем комбинированного применения поляризационной нейтронной и резонансной рентгеновской магнитной рефлектометрии, а внутри антиферромагнитных слоев — комбинированного применения рентгеновской и нейтронной дифрактометрии.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант № 10-02-96033-р_урал), программы Президиума РАН (грант № 09-Р-2-1037) и программы поддержки ведущих научных школ (грант Н.Ш.-3545.2010.02).

1. Магнитные наноструктуры, содержащие тонкие слои ферромагнитных и антиферромагнитных металлов, представляют большой интерес как с точки зрения фундаментальной физики, так и в качестве потенциальных элементов спинтронных устройств. На ранних этапах исследования магнитных наноструктур основное внимание, как правило, уделялось определению магнитных моментов, усредненных по отдельным слоям, и межслойному обменно-взаимодействию, однако в последние годы усиливается интерес к исследованию внутрислойной магнитной структуры. Для того чтобы понимать природу эффектов, наблюдаемых в магнитных наноструктурах, и контролируемым образом модифицировать их свойства, необходимо иметь возможность прецизионно определять (на атомном уровне) неоднородные профили намагниченности внутри отдельных слоев, которые типичны для таких систем. В настоящей работе мы обсуждаем комплементарное применение нейтронных и рентгеновских синхронных методов для определения магнитной структуры внутри тонких ферромагнитных и антиферромагнитных слоев. Применение рассматриваемых методов иллюстрируется на примере магнитно-неоднородных систем: ферромагнитных сверхрешеток Fe/Gd, а также антиферромагнитных наноструктур Cr/V, для которых характерно распространение несоизмеримой волны спиновой плотности внутри слоев хрома.

2. Гетероструктуры на основе Cr — это антиферромагнитные системы, в которых распространяется волна спиновой плотности (ВСП), несоизмеримая с периодичностью ОЦК-решетки Cr. ВСП представляет собой периодическую модуляцию величины антиферромагнитно-упорядоченных магнитных моментов Cr с типичным периодом 50–70 Å. ВСП в системах на основе Cr сосуществует с волной зарядовой плот-

ности и волной упругих напряжений (ВУН), которые представляют собой периодическую модуляцию соответственно зарядовой плотности и межатомных расстояний с периодом вдвое меньше периода ВСП [1]. Эпитаксиальные напряжения, примеси, размерные эффекты и эффекты близости от соседних слоев могут привести к трансформации несоизмеримой ВСП в ВСП, соизмеримую с периодом кристаллической решетки Cr.

Переход между соизмеримой и несоизмеримой фазами ВСП может существенным образом сказаться на магнитных свойствах всей системы. Например, эффект гигантского магнитосопротивления, характерный для многослойных структур Fe/Cr, наблюдается только в системах с соизмеримой ВСП в слоях Cr и исчезает при переходе ВСП в несоизмеримую фазу [2]. С другой стороны, в Fe/Cr-гетероструктурах со сравнительно толстыми слоями хрома наблюдается эффект однонаправленной анизотропии, который исчезает при переходе ВСП в слои хрома из несоизмеримой в соизмеримую фазу [3]. Величина и знак эффекта во многом определяются периодом, поляризацией и направлением распространения несоизмеримой ВСП в слоях хрома.

Магнитное рассеяние нейтронов позволяет непосредственно определить магнитное состояние в слоях Cr и в принципе способно предоставить полную информацию о свойствах ВСП [1]. Модуляция величины магнитного момента Cr в несоизмеримой ВСП приводит к возникновению спутников, наблюдаемых при рассеянии нейтронов вблизи запрещенных брэгговских пиков. В случае соизмеримой ВСП нейтронные рефлексы наблюдаются непосредственно в позициях запрещенных пиков. Однако интенсивности потока нейтронов на современных исследовательских реакторах зачастую недостаточны для получения результатов с высоким разрешением. С другой

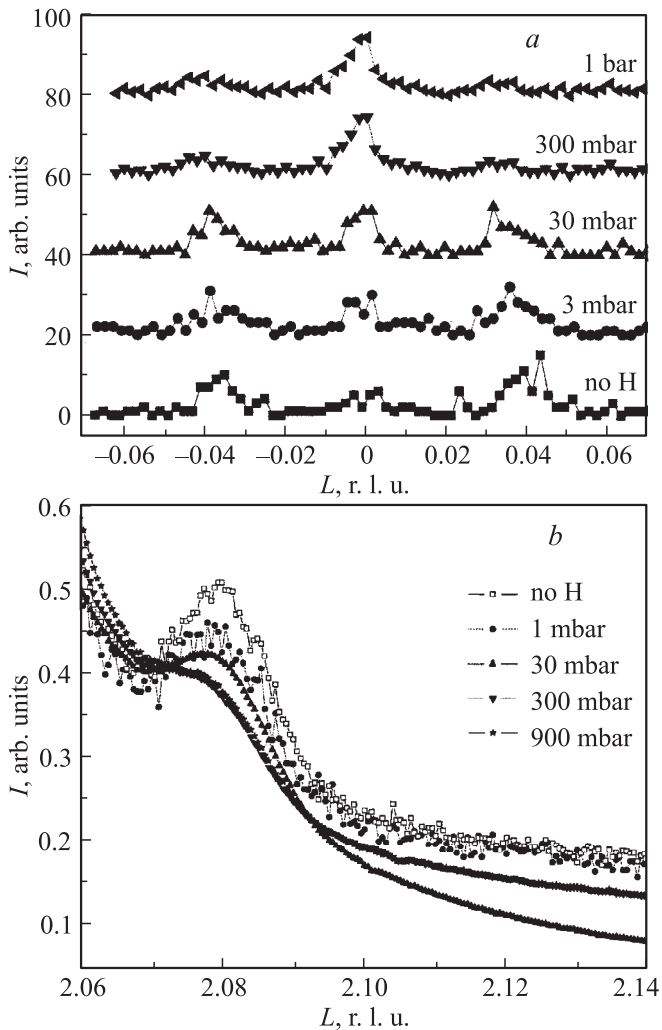


Рис. 1. Влияние давления водорода на температурную зависимость ВСП и ВУН спателлитов в $[\text{Cr}(500 \text{ \AA})/\text{C}(14 \text{ \AA})]_4$ по данным рассеяния нейтронов (a) и рентгеновского синхронного излучения (b).

стороны, рассеяние синхронного рентгеновского излучения позволяет детектировать спателлиты, возникающие вблизи фундаментальных брэгговских пиков Cr из-за распространения ВУН, и таким образом определять свойства ВУН с очень высоким разрешением, но при этом теряется информация о поляризации ВСП. Кроме того, рентгеновская дифракция неспособна предоставить какую-либо информацию о соизмеримой ВСП. Несмотря на то что применение любой из двух указанных методик не позволяет определить полную магнитную фазовую диаграмму системы с высоким разрешением, это становится возможным при комбинированном использовании сразу двух методик. При этом нейтронная дифракция позволяет качественно определить поляризацию и направление распространения ВСП, а рентгеновская дифракция — с высоким разрешением количественно определить период и температуру Нееля несоизмеримой ВСП.

Описанный выше комплементарный подход был использован нами для исследования эффектов близости на спин-волновое состояние в гетероструктурах Cr/V [4,5]. На рис. 1 результаты нейтронного и синхронного рассеяния в гетероструктурах $[\text{Cr}(500 \text{ \AA})/\text{V}(14 \text{ \AA})]_4$, которые дают прямое экспериментальное доказательство того, что насыщение водородом слоев ванадия позволяет контролируемым образом модифицировать спин-волновое состояние в слоях хрома и, в частности, обратным образом осуществлять переход между несоизмеримой и соизмеримой фазами ВСП [5]. Эта возможность управления спин-волновым состоянием может оказаться полезной при создании спинтронных устройств с использованием наногетероструктур на основе хрома.

3. Определение неоднородного профиля намагниченности внутри тонких ферромагнитных слоев представляет собой очень сложную задачу, особенно если магнитные моменты могут изменяться как по величине, так и по направлению. К числу наиболее мощных методов для таких исследований относятся поляризационная нейтронная рефлектометрия (ПНР) и резонансная рентгеновская магнитная рефлектометрия (РРМР). ПНР основана на анализе спин-зависимого зеркального отражения поляризованных нейтронов от поверхности магнитных наногетероструктур. Преимуществом этой методики является то, что она основана на прямом взаимодействии спина нейтронов с атомными магнитными моментами и позволяет получить информацию о толщинной зависимости двух компонент магнитного момента, лежащих в плоскости образца. С другой стороны, эта техника не обладает чувствительностью к элементному составу и ввиду низкой интенсивности нейтронных пучков имеет ограниченное пространственное разрешение. При работе в режиме жесткого рентгеновского излучения РРМР основана на использовании резонансного усиления магнитного рассеяния рентгеновских лучей вблизи K -краев переходных металлов и L -краев редкоземельных элементов. РРМР обеспечивает как чувствительность к элементному составу, так и высокое пространственное разрешение. Однако при работе с циркулярно поляризованным излучением с помощью РРМР можно измерить только одну компоненту магнитного момента, лежащую в плоскости образца и в плоскости рассеяния. Кроме того, не всегда возможно измерить резонансные магнитные сигналы для всех элементов, присутствующих в исследуемых наногетероструктурах.

Комплементарный подход, сочетающий ПНР и РРМР, позволяет компенсировать недостатки и усилить достоинства обоих методов и таким образом определять неоднородные элемент-чувствительные профили намагниченности в ферромагнитных наногетероструктурах с очень высоким пространственным разрешением. Как было продемонстрировано нами на примере гетероструктур $[\text{Fe}(35 \text{ \AA})/\text{Gd}(50 \text{ \AA})]_5$ [6], одновременный самосогласованный анализ рентгеновских и нейтронных рефлектометрических спектров позволяет определять элемент-чувствительные толщинные зависимости векто-

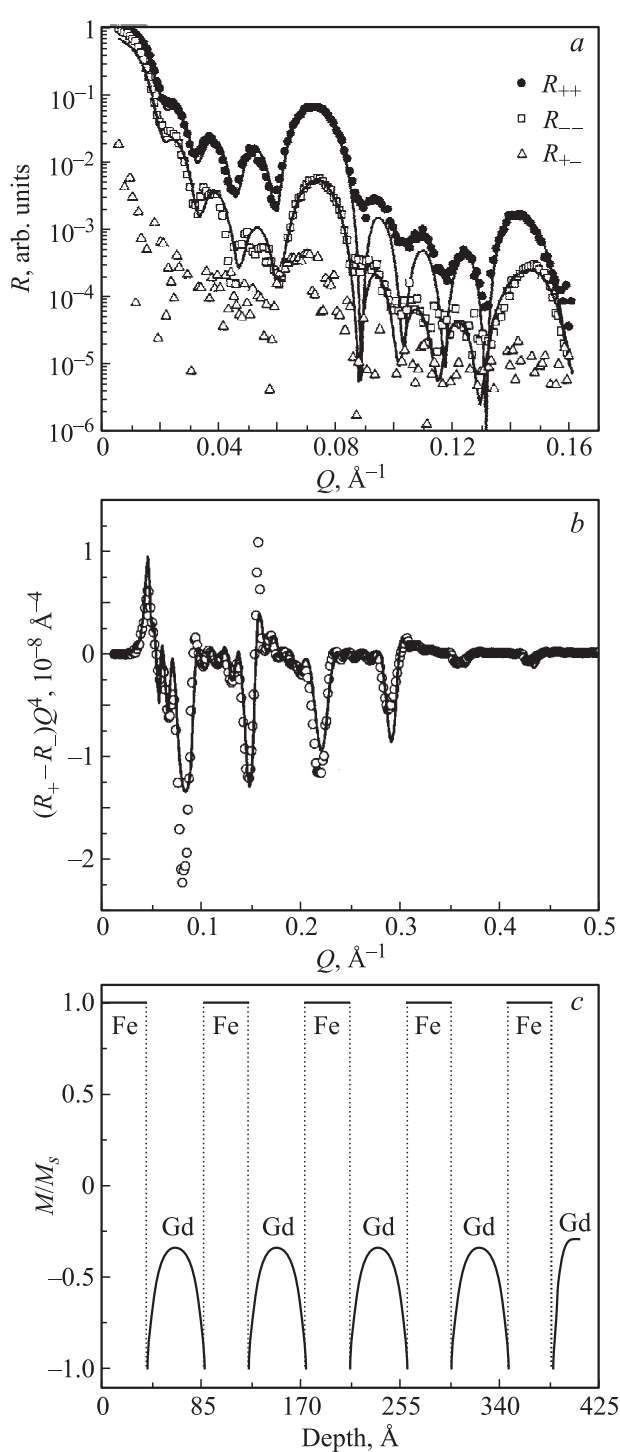


Рис. 2. Экспериментальные (символы) и расчетные (линии) ПНР-спектры (a) и РРМР-спектры на L_2 -крае поглощения Gd ($E = 7929 \text{ eV}$) (b) от сверхрешетки $[\text{Fe}(35 \text{ \AA})/\text{Cd}(50 \text{ \AA})]_5$, измеренные при $T = 140 \text{ K}$, $H = 500 \text{ Oe}$. c — толщина зависимость величины магнитного момента в гетероструктуре Fe/Gd по данным одновременного самосогласованного анализа ПНР- и РРМР-спектров. Q — вектор рассеяния, R — коэффициент отражения поляризованных нейтронов, $R_+ - R_-$ — разность коэффициентов отражения фонов положительной и отрицательной циркулярных поляризаций.

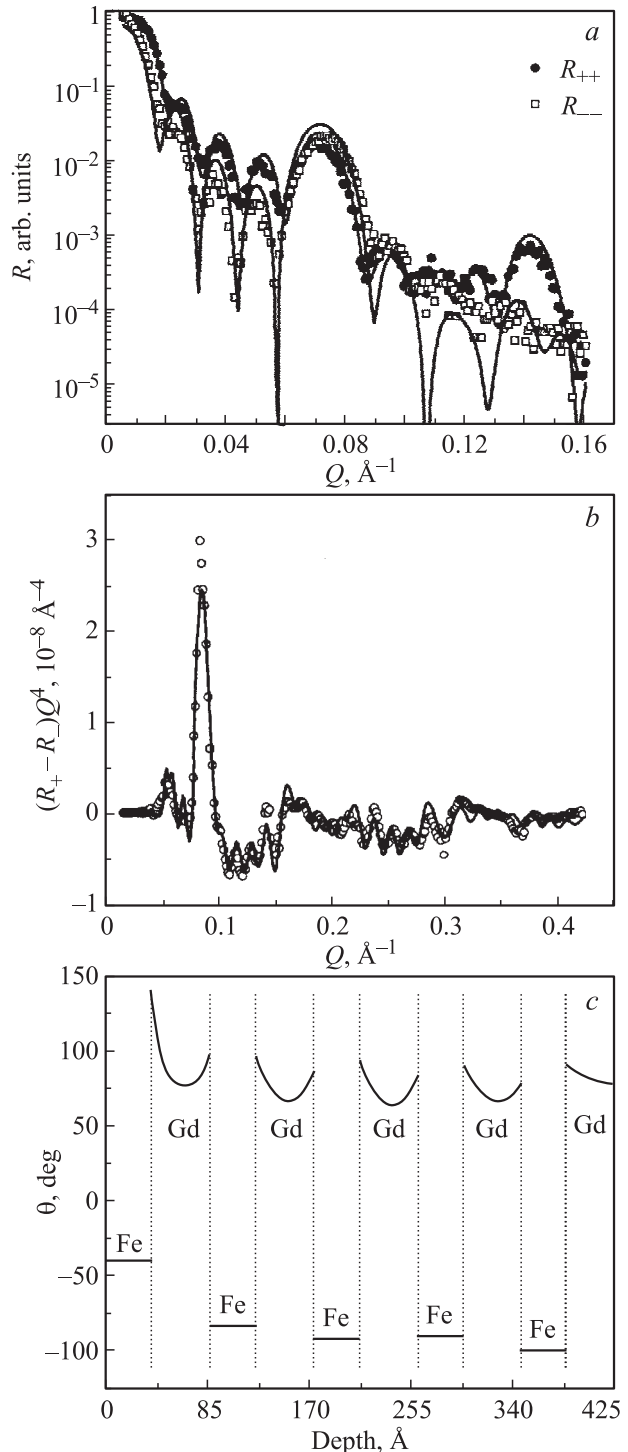


Рис. 3. Экспериментальные (символы) и расчетные (линии) ПНР-спектры (a) и РРМР-спектры на L_2 -крае поглощения Gd ($E = 7929 \text{ eV}$) (b) от сверхрешетки $[\text{Fe}(35 \text{ \AA})/\text{Cd}(50 \text{ \AA})]_5$, измеренные при $T = 20 \text{ K}$, $H = 5 \text{ kOe}$. c — толщина зависимость угла поворота магнитных моментов в гетероструктуре Fe/Gd по данным одновременного самосогласованного анализа ПНР- и РРМР-спектров. Обозначения те же, что на рис. 2.

ра намагниченности в плоскости слоев в мультислойных системах с беспрецедентной точностью, включая определение неоднородной внутрислойной магнитной структуры с разрешением, близким к атомному.

На рис. 2 приведены спектры ПНР и РРМР от гетероструктуры Fe/Gd, а также определенные путем самосогласованной обработки данных профили намагниченности при значениях температуры $T = 140$ К и магнитного поля $H = 500$ Ое. Как следует из приведенных результатов, в этом случае внутри слоев гадолиния наблюдается неоднородное магнитное состояние, характеризующееся усилением магнитного момента вблизи интерфейсов Fe/Gd и уменьшением их в середине слоев. Рис. 3 демонстрирует пример неоднородного магнитного состояния (реализующегося при $T = 20$ К, $H = 5$ кОе), когда наблюдается сильное вращение магнитных моментов внутри слоев гадолиния, причем магнитные моменты Gd ориентированы по направлению приложенного магнитного поля в середине слоев и против магнитного поля в интерфейсной области. Как следует из приведенных результатов, по сравнению с данными, полученными с помощью только одной из используемых нами методик (см., например, [7–9]), применение комплементарного подхода позволяет определить неоднородное распределение вектора намагниченности внутри отдельных слоев с разрешением в несколько атомных монослоев.

4. В заключение можно сделать вывод, что комплементарное применение нейтронного и рентгеновского синхронного рассеяния позволяет с высоким разрешением определять неоднородную магнитную структуру внутри ферромагнитных и антиферромагнитных слоев в металлических наногетероструктурах. Мы подчеркиваем важность такого комбинированного подхода, поскольку он позволяет получить результаты, которых невозможно добиться при использовании только одной из этих методик. Развитие и использование комплементарных нейтронных и рентгеновских методик значительно расширяет экспериментальные возможности при исследовании и дизайне новых материалов и устройств спинтроники.

Список литературы

- [1] E. Fawcett. *Rev. Mod. Phys.* **60**, 209 (1988).
- [2] E.E. Fullerton, K.T. Riggs, C.H. Sowers, S.D. Bader. *Phys. Rev. Lett.* **75**, 330 (1995).
- [3] J.S. Parker, L. Wang, K.A. Steiner, P.A. Crowell, C. Leighton. *Phys. Rev. Lett.* **97**, 227 206 (2006).
- [4] E. Kravtsov, R. Brucas, B. Hjörvarsson, A. Hoser, A. Liebig, G.J. McIntyre, M.A. Milyaev, A. Nefedov, L. Paolasini, F. Radu, A. Remhof, V.V. Ustinov, F. Yakhov, H. Zabel. *Phys. Rev. B* **76**, 024 421 (2007).
- [5] E. Kravtsov, A. Nefedov, G. Nowak, K. Zhernenkov, H. Zabel, B. Hjörvarsson, A. Liebig, A. Hoser, G.J. McIntyre, L. Paolasini, A. Remhof. *J. Phys.: Cond. Matter* **21**, 336 004 (2009).
- [6] E. Kravtsov, D. Haskel, S.G.E. te Velthuis, J.S. Jiang, B.J. Kirby. *Phys. Rev. B* **79**, 134 438 (2009).
- [7] C. Dufour, K. Cherifi, G. Marchal, Ph. Mangin, M. Hennion. *Phys. Rev. B* **47**, 14 572 (1993).
- [8] W. Hahn, M. Loewenhaupt, Y.Y. Huang, G.P. Felcher, S.S.P. Parkin. *Phys. Rev. B* **52**, 16 041 (1995).
- [9] D. Haskel, G. Srajer, Y. Choi, D.R. Lee, J.C. Lang, J. Meersschart, J.S. Jiang, S.D. Bader. *Phys. Rev. B* **67**, 180 406(R) (2003).