

Экспериментальное подтверждение нового метода улучшения поляризующих нейтронных покрытий

© Н.К. Плешанов, А.П. Булкин, В.Г. Сыромятников

Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова РАН,
Гатчина, Ленинградская обл., Россия

E-mail: pnk@pnpi.spb.ru

Экспериментально подтвержден новый метод улучшения поляризующих нейтронных покрытий, основанный на подавлении отражения нейтронов с нежелательным спином за счет использования на границах слоев поляризующего покрытия прослоек Ti с отрицательным потенциалом („антибарьерных слоев“). Можно ожидать, что дальнейшее развитие метода приведет к созданию поляризующих нейтронных суперзеркал и многослойных монокроматоров нового поколения со спектральными флип-отношениями до 10^3 . Нейтронная оптика на основе таких „суперполяризующих“ покрытий не только улучшит работу и таким образом расширит диапазон применений поляризующих устройств, но и может стать основой для конструирования новой нейтронной приборной техники.

1. Введение

Использование поляризованных нейтронов часто является единственным способом извлечь прямую, подробную и надежную информацию о магнитном состоянии образца, получить представление об особенностях динамических процессов, определяющих фундаментальные физические свойства высокотехнологичных материалов. Получению достоверной и точной информации в экспериментах со спин-независимым нейтронным рассеянием способствует увеличение не только пропускной способности, но и поляризующей эффективности нейтронных поляризаторов и анализаторов. Для обеспечения приемлемого разрешения нейтронных приборов в большинстве случаев формируются пучки со сравнительно небольшой расходимостью, а поляризация рассеянных нейтронов анализируется по множеству каналов с небольшой угловой апертурой. В этом случае нейтронно-оптические поляризаторы [1,2] остаются приемлемыми и часто оказываются эффективнее ^3He -спиновых фильтров [3,4]. Поэтому их развитие остается актуальной задачей.

В настоящее время основой нейтронно-оптических поляризаторов, анализаторов и поляризующих монокроматоров являются многослойные поляризующие нейтронные покрытия. Пропускную способность поляризаторов и анализаторов увеличивают использованием суперзеркал [5]. Плавное изменение толщин слоев в суперзеркале от бислоя к бислою позволяет эффективно отражать нейтроны на всех углах скольжения вплоть до угла, в m раз превышающего угол, соответствующий краю полного отражения никеля, одного из лучших нейтронных отражателей. Поляризующие суперзеркала строят в виде чередующихся слоев магнитных и немагнитных материалов, подобранных так, чтобы минимизировать нейтронно-оптический контраст для одной из спиновых компонент.

Неполную поляризацию пучка при использовании поляризующих суперзеркальных покрытий связывали с отражением нейтронов с нежелательным спином от

антиотражающего подслоя (в некоторых случаях от подложки) и от границ магнитных и немагнитных слоев из-за неравенства их потенциалов. Состав и толщина антиотражающего подслоя, как правило, подбирались эмпирическим путем. В работе [6] разработан алгоритм оптимизации состава и толщины антиотражающего подслоя, представлен подробный анализ и наиболее полное экспериментальное исследование зеркального отражения нейтронов от Gd-содержащих покрытий, используемых в нейтронной поляризационной оптике в качестве антиотражающего подслоя. Точная подгонка потенциалов магнитного и немагнитного слоев на уровне, близком к нулю, возможна для суперзеркал CoFe(V)/TiZr [2] и CoFeV/TiN [7] на основе материалов с изменяющимся составом. Это позволило снизить отражение нейтронов с нежелательным спином до уровня около 1%. Теоретически этот уровень должен быть гораздо ниже, поэтому необходимо было выявить другие факторы, ухудшающие поляризующую эффективность.

С помощью нейтронной рефлектометрии было показано, что верхний слой суперзеркала, окисляясь на воздухе, образует потенциальный барьер и усиливает отражение нейтронов с нежелательным спином при малых переданных импульсах q [8]. Также был установлен [9,10] еще более существенный фактор, ухудшающий поляризующую способность суперзеркал, а именно формирование вблизи границ магнитных слоев областей с нулевой намагниченностью („магнитно-мертвых“ слоев). Множество таких областей образуют последовательность потенциальных барьеров для нейтронов с нежелательным спином и усиливают их отражение не только при малых, но и при больших значениях переданного импульса q . Происхождение приграничных областей связывали с диффузией немагнитного материала в магнитный. В работе [11] на основе тщательного анализа экспериментальных данных определены, причем с рекордной точностью (0.02 nm), толщина приграничных областей как областей между структурной и магнитной границами и разность между структурной и меньшей по величине магнитной шероховатостями. В [11]

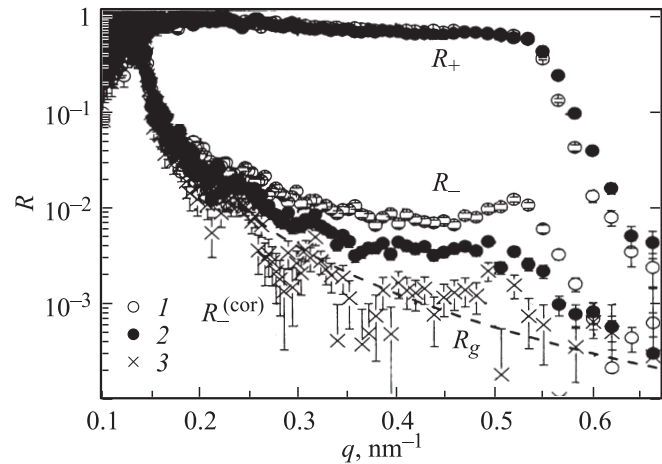
сделан вывод о том, что происхождение „магнитно-мертвых“ областей связано не с межслойной диффузией, а с индуцированным структурной шероховатостью спин-ориентационным беспорядком в ультратонком приграничном слое ферромагнетика. После учета различия магнитной и структурной шероховатости впервые удалось получить удовлетворительную и взаимосогласованную подгонку коэффициентов отражения нейтронов с противоположными спинами от поляризующих суперзеркал. При этом также были учтены растущая от слоя к слою по достаточно сложному закону шероховатость [12], наличие антиотражающего покрытия под основной структурой, окисного слоя на ее поверхности и приграничных областей в магнитных слоях с нулевой средней намагниченностью, несовпадение потенциалов магнитных и немагнитных слоев для нейтронов с нежелательным спином.

Данная модель была использована для анализа возможностей улучшения поляризующей эффективности суперзеркал [13]. Из проведенных расчетов, в частности, следует, что прослойки Ti на каждой из границ магнитных слоев и защитный бислой Ti/TiO₂ на поверхности должны подавить отражение нейтронов с нежелательным спином на порядки величины и таким образом существенно улучшить поляризующую эффективность суперзеркал во всем рабочем диапазоне переданных импульсов.

2. Эффект применения прослоек Ti в суперзеркале CoFe/TiZr

При производстве поляризующих суперзеркал на магнетронной установке ДИОГЕН (ПИЯФ, Гатчина) используются три мишени: CoFe, TiZr и TiZrGd. Для экспериментальной проверки эффективности применения прослоек Ti мишень TiZrGd, с которой напыляется антиотражающий подслой, заменили мишенью Ti. Затем приготовили два суперзеркальных покрытия на стеклянной подложке: 1) разработанное ранее [12] покрытие ($m = 2.5$) из 195 бислоев CoFe/TiZr; 2) покрытие с прослойками Ti толщиной $d_{Ti} = 1.5$ nm на каждой из межслойных границ. В последнем случае для сохранения четвертьволнового условия толщина слоев TiZr была уменьшена на $2d_{Ti}$, а толщина слоев CoFe не изменялась. На рисунке представлены коэффициенты отражения нейтронов со спином по полю R_+ и против поля R_- для суперзеркал CoFe/TiZr (1) и CoFe/Ti/TiZr/Ti (2).

Коэффициент отражения R_+ второго суперзеркала в рабочем диапазоне переданных импульсов ($q < 0.53$ nm⁻¹) до 5% ниже соответствующего коэффициента отражения первого суперзеркала. Это означает, что появление в многослойной структуре прослоек Ti привело к некоторому увеличению скорости роста шероховатости от слоя к слою. В дальнейшем режим напыления суперзеркальной структуры будет оптимизироваться.



Коэффициенты отражения нейтронов со спином по полю (R_+) и против поля (R_-) суперзеркальных ($m = 2.5$) покрытий CoFe/TiZr (1) и CoFe/Ti/TiZr/Ti (2) без антиотражающего подслоя в зависимости от переданного импульса q . Толщина прослоек Ti составляет 1.5 nm. 3 — скорректированный на неполную поляризацию падающего пучка и эффективность флиппера коэффициент отражения нейтронов со спином против поля $R_-^{(cor)}$. Штриховая кривая — коэффициент отражения нейтронов от стеклянной подложки R_g .

Особый интерес представляет сравнение коэффициентов отражения нейтронов со спином против поля R_- суперзеркал без прослоек и с прослойками Ti. В отсутствие антиотражающего подслоя на малых переданных импульсах $q < 0.15$ nm⁻¹ главную роль играет отражение от стеклянной подложки (штриховая кривая R_g на рисунке). При $q > 0.15$ nm⁻¹ отражение нейтронов со спином „вниз“ от структуры с прослойками существенно ниже. После коррекции на неполную поляризацию падающего пучка и эффективность флиппера эффект составляет порядок величины. Использование подслоя позволит в дальнейшем подавить отражение на малых q .

3. Заключение

Экспериментально подтвержден предложенный и обоснованный одним из авторов [13] метод улучшения поляризующих нейтронных покрытий. Уменьшение отражения нейтронов с нежелательным спином на целый порядок по сравнению с существующими покрытиями является очень важным прорывом в развитии поляризационной оптики. Можно ожидать, что развитие метода улучшения эффективности нейтронных покрытий приведет к созданию поляризующих нейтронных суперзеркал и многослойных монохроматоров нового поколения со спектральными флип-отношениями до 10^3 . Поляризующая нейтронная оптика на основе таких „суперполяризующих“ покрытий не только улучшит работу и таким образом расширит диапазон применений поляризующих устройств, но и может стать основой для конструирования новой нейтронной приборной техники. Достаточно упомянуть монохроматор на основе пространственного

спинового резонанса („гармошки Драбкина“) [14], создание которого возможно только при наличии поляризатора и анализатора с очень высокими поляризующими эффективностями в широком диапазоне длин волн [15]. Уникальность такого монохроматора состоит в том, что за доли миллисекунды его можно перестроить с одной длины волны на другую или изменить ширину пика.

В дальнейшем необходимо оптимизировать толщину прослойки, ввести антиотражающий подслои, построить суперзеркало с более высоким уровнем коэффициента отражения $R_+(q)$, который определяет пропускную способность нейтронно-оптических поляризационных устройств и в конечном счете светосилу нейтронных приборов.

Авторы выражают благодарность Н.Г. Кольвановой, В.Ю. Сухареву и В.П. Грекову за изготовление образцов.

Список литературы

- [1] O. Schärpf. *Physica B* **156–157**, 639 (1989).
- [2] A.F. Schebetov, N.K. Pleshanov, V.M. Pusenkov, B.G. Peskov, G.E. Shmelev, W.H. Kraan, P.T. Por, M.Th. Rekveldt, V.E. Mikhailova. *Nucl. Instrum. Meth. B* **94**, 575 (1994).
- [3] D.S. Hussey, D.R. Rich, A.S. Belov, C. Tong, H. Yang, C. Bailey, C.D. Keith, J. Hartfield, G.D.R. Hall, T.C. Black, W.M. Snow. *Rev. Sci. Instrum.* **76**, 053 503 (2005).
- [4] M. Wolf, F. Radu, A. Petoukhov, H. Humbliot, D. Jullien, K. Andresern, H. Zabel. *Neutron News* **17**, 2, 26 (2006).
- [5] F. Mezei. *Commun. Phys.* **1**, 81 (1976).
- [6] N.K. Pleshanov, B.G. Peskov, V.M. Pusenkov, V.G. Syromyatnikov, A.F. Schebetov. *Nucl. Instrum. Meth. A* **560**, 2, 464 (2006).
- [7] D. Clemens, P. Böni, H.P. Friedli, R. Göttel, C. Fermon, H. Grimmer, H. Van Swygenhoven, J. Archer, F. Klose, Th. Krist, F. Mezel, P. Thomas. *Physica B* **213–214**, 942 (1995).
- [8] V.M. Pusenkov, S.V. Metelev, N.K. Pleshanov, V.G. Syromyatnikov, V.A. Ul'yanov, A.F. Schebetov. *Physica B* **348**, 285 (2004).
- [9] M. Vergnat, C. Dufour, A. Bruson, S. Houssani, G. Marchal, Ph. Mangin, J.J. Rhyne, R. Erwin, C. Vettier. *J. Phys. Coll. C7 (Suppl.)* **50**, 10, 207 (1989).
- [10] N.K. Pleshanov, V.M. Pusenkov, A.F. Schebetov, B.G. Peskov, G.E. Shmelev, R.V. Siber, Z.N. Soroko. *Physica B* **198**, 27 (1994).
- [11] N.K. Pleshanov, B.G. Peskov, A.F. Schebetov, V.G. Syromyatnikov, B. Chen, C.Q. Huang, X.X. Li. *Physica B* **397**, 62 (2007).
- [12] N.K. Pleshanov, N.G. Kolyvanova, S.V. Metelev, B.G. Peskov, V.M. Pusenkov, V.G. Syromyatnikov, V.A. Ul'yanov, A.F. Schebetov. *Physica B* **369**, 234 (2005).
- [13] N.K. Pleshanov. Preprint PNPI-2659. Gatchina (2006). 18 p. *Nucl. Instrum. Methods A* 613, 15 (2010).
- [14] M.M. Agamalian, G.M. Drabkin, V.I. Sbitnev. *Phys. Rep.* **168**, 265 (1988).
- [15] M. Agamalyan, N.K. Pleshanov, V.M. Pusenkov. *SPIE, Neutron Opt. Dev. Appl.* 1738, 80 (1992).