

05,13

Структура и магнетизм сверхрешеток Co/Dy

© М.В. Макарова^{1,2}, Е.А. Кравцов^{1,2}, В.В. Проглядо¹, Yu. Khaydukov^{3,4}, В.В. Устинов^{1,2}

¹ Институт физики металлов УрО РАН,
Екатеринбург, Россия

² Уральский федеральный университет,
Екатеринбург, Россия

³ Max Planck Institute for Solid State Physics,
Stuttgart, 70569 Germany

⁴ Max Planck Society Outstation at Heinz Maier-Leibnitz Zentrum,
Garching, Germany

E-mail: kravtsov@imp.uran.ru

Поступила в Редакцию 26 марта 2020 г.

В окончательной редакции 26 марта 2020 г.

Принята к публикации 2 апреля 2020 г.

Исследовано влияние структурных свойств на формирование перпендикулярной магнитной анизотропии в сверхрешетках Co/Dy. Установлено, что сверхрешетки представляют собой композиционно-модулированный сплав, в котором, с одной стороны, выдерживается строгая периодичность в толщинах и композиции слоев, а с другой стороны, интердиффузия Co и Dy на межслойных границах приводит к периодическому изменению с глубиной концентрации Co и Dy. Показано, что перпендикулярная магнитная анизотропия в Co/Dy обусловлена перпендикулярной ориентацией намагниченности в слоях сплава CoDy, в то время как намагниченность слоев Co ориентирована в плоскости образца.

Ключевые слова: металлические магнитные сверхрешетки, межслойное магнитное упорядочение, перпендикулярная магнитная анизотропия, рефлектометрия поляризованных нейтронов.

DOI: 10.21883/FTT.2020.09.49776.15H

1. Введение

Многослойные наноструктуры, образованные чередующимися слоями магнитных редкоземельных и переходных металлов (РЗМ/ПМ) — популярные объекты исследований в современной спинтронике, для которых характерно проявление ряда уникальных магнитных свойств. Во-первых, поскольку магнитные моменты тяжелых РЗМ и ПМ упорядочиваются антипараллельно, а температуры Кюри и магнитные моменты этих металлов различны, то, варьируя толщины слоев и температуру, можно в широких пределах изменять магнитное упорядочение в таких системах, в том числе добиваться компенсации магнитных моментов РЗМ и ПМ подрешеток. Во-вторых, в РЗМ/ПМ наноструктурах со сравнительно тонкими слоями возможно наличие перпендикулярной магнитной анизотропии (ПМА). Магнитные наноструктуры, в которых можно обеспечить магнитную компенсацию и наблюдается ПМА, сегодня широко востребованы в различных устройствах магнитной спинтронике, например, в магнитооптических и термических системах записи и хранения информации со сверхбыстрым переключением намагниченности, наноосцилляторах и др.

Первыми РЗМ/ПМ сверхрешетками, в которых ПМА наблюдалась для сравнительно толстых слоев (до 18 Å), были системы Co/Dy [1–3]. Недавно нами было показано, ПМА в сверхрешетках Co/Dy может наблюдаться и при более толстых слоях Co и Dy (до 30 Å) в зависимости

от микроструктуры образцов [4]. В настоящей работе мы сообщаем об исследовании влияния кристаллической структуры на магнитную анизотропию и магнитное упорядочение сверхрешеток Co/Dy с различными толщинами слоев Co.

2. Эксперимент

Были исследованы две сверхрешетки [Co(12 Å)/Dy(12 Å)]₄₀ и [Co(30 Å)/Dy(12 Å)]₄₀, выращенные методом высоковакуумного магнетронного распыления на монокристаллических подложках (001)Si с буферным слоем Nb толщиной 100 Å и защитным слоем Al толщиной 100 Å. Синтез образцов проводился при комнатной температуре, рост многослойной структуры на поверхности буферного слоя Nb начинался со слоя Dy и заканчивался слоем Co. Рентгеноструктурные исследования были выполнены в геометрии параллельного пучка на лабораторном дифрактометре PANalytical Empyrean Series 2 с использованием Fe-K_α и Co-K_α излучения. Магнитометрические измерения выполнены на вибрационном магнетометре Lake Shore 7407 в магнитных полях до 15 kOe и при температурах от комнатной до 70 K. Измерения рефлектометрии поляризованных нейтронов были выполнены в стандартной $\theta-2\theta$ геометрии на рефлектометре NREX на исследовательском реакторе FRM II (Гархинг, Германия). Измерения с полным поляризационным анализом

проведены на длине волны $4.26 \pm 0.06 \text{ \AA}$, эффективность поляризатора была 99.99%, анализатора — 98%.

3. Результаты и обсуждение

Свойства слоистой структуры образцов и структуры межслойных границ были определены с помощью рентгеновской рефлектометрии высокого разрешения. На рис. 1 представлены результаты рефлектометрических исследований сверхрешеток и результаты их обработки (фитирования), для удобства представления рефлектометрические кривые для разных образцов умножены на различные постоянные коэффициенты. Из обработки рефлектометрических кривых установлено, что, с одной стороны, в сверхрешетках сохраняется строгая периодичность слоистой структуры, а с другой стороны, наблюдается значительное перемешивание Dy и Co на межслойных границах, толщина переходного слоя DyCo может достигать 8 Å. Таким образом, можно утверждать что сверхрешетки представляют собой композиционно-модулированный сплав с периодически изменяющейся с глубиной концентрацией Co и Dy. В образце Co(12 Å)/Dy(12 Å) нами не было обнаружено сплошных слоев Dy и Co, в образце Co(30 Å)/Dy(12 Å) присутствует как сплав DyCo, так и сплошной слой Co толщиной 19 Å.

Кристаллическая структура образцов была определена с помощью рентгеновской дифракции в геометрии скользящего падения (угол падения 1°) с использованием Co- K_α -излучения. На рис. 2 представлены дифрактограммы, измеренные для обоих образцов. Из дифрактограмм видно, что в скане от образца Co(12 Å)/Dy(12 Å) присутствует исключительно сигнал от сплава DyCo₃(11–20), что согласуется с данными рентгеновской рефлектометрии. На дифрактограмме от Co(30 Å)/Dy(12 Å) присут-

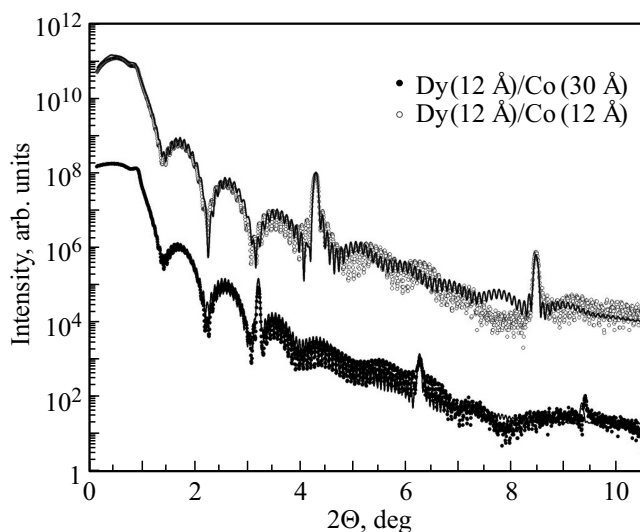


Рис. 1. Кривые рентгеновской рефлектометрии (символы) и результаты их обработки (сплошные линии) для сверхрешеток Co(12 Å)/Dy(12 Å) и Co(30 Å)/Dy(12 Å).

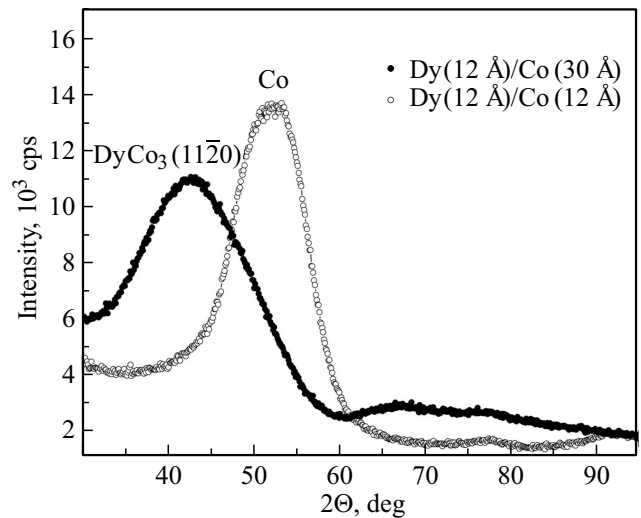


Рис. 2. Рентгеновские дифрактограммы для сверхрешеток Co(12 Å)/Dy(12 Å) и Co(30 Å)/Dy(12 Å), измеренные в геометрии скользящего падения.

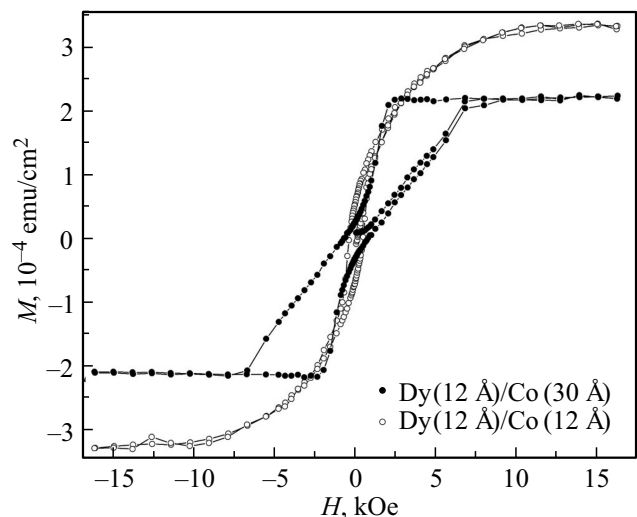


Рис. 3. Петли гистерезиса для сверхрешеток Co(12 Å)/Dy(12 Å) и Co(30 Å)/Dy(12 Å), измеренные при температуре $T = 80 \text{ K}$ при ориентации магнитного поля вдоль нормали к поверхности.

ствует сигнал от Co. К сожалению, пик на дифрактограмме достаточно широкий, что не позволяет установить кристаллографическую ориентацию Co: сигнал может быть как от ГПУ Co(0002), так и от ГЦК Co(111). Тем не менее, данные рентгеновской дифрактометрии однозначно подтверждают наличие чистого кристаллического Co в образце Co(30 Å)/Dy(12 Å) и полное его отсутствие в Co(12 Å)/Dy(12 Å).

Комбинированные магнитные и нейтронографические измерения показали, что намагниченность сверхрешетки Co(12 Å)/Dy(12 Å) при всех температурах ориентирована перпендикулярно поверхности образца, в то время как в образце Co(30 Å)/Dy(12 Å) она направлена под

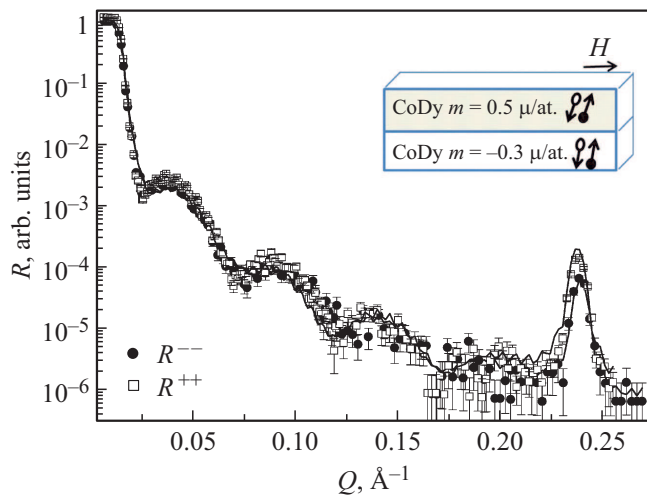


Рис. 4. Кривые рефлектометрии поляризованных нейтронов (символы) и результаты их обработки (сплошные линии) для сверхрешетки Co(12 Å)/Dy(12 Å), измеренные в магнитном поле 1.5 кОе при температуре $T = 80$ К.

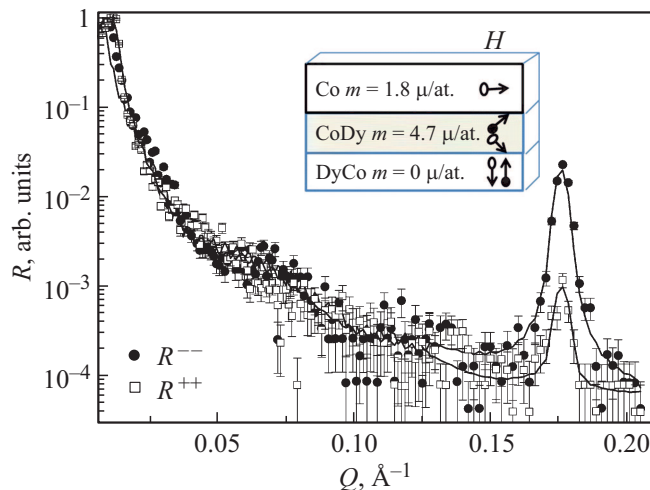


Рис. 5. Кривые рефлектометрии поляризованных нейтронов (символы) и результаты их обработки (сплошные линии) для сверхрешетки Co(30 Å)/Dy(12 Å), измеренные в магнитном поле 1.5 кОе при температуре $T = 80$ К.

некоторым углом к нормали. На рис. 3 представлены петли гистерезиса для обоих образцов, измеренные при ориентации магнитного поля вдоль нормали к поверхности при температуре $T = 80$ К (несколько выше температуры объемного Dy). Петля гистерезиса сверхрешетки Co(12 Å)/Dy(12 Å) свидетельствует об ориентации магнитных моментов преимущественно перпендикулярно поверхности, в то время как в сверхрешетке Co(30 Å)/Dy(12 Å) вдоль нормали к поверхности ориентирована ось трудного намагничивания. Магнитные свойства образца Co(30 Å)/Dy(12 Å) значительно отличаются от свойств системы Co(30 Å)/Dy(20 Å), в которой при температуре $T = 90$ К магнитные моменты были ориентированы вдоль нормали к поверхности и

лишь при $T = 150$ К происходит их переориентация [4]. Таким образом, уменьшение толщины слоев Dy с 20 Å до 12 Å приводит к ослаблению перпендикулярной магнитной анизотропии и уменьшению температуры ориентационного перехода от перпендикулярной к параллельной ориентации относительно нормали к поверхности.

На рис. 4 и 5 представлены результаты измерений рефлектометрии поляризованных нейтронов для обоих образцов, выполненные при температуре 80 К в магнитном поле 1.5 кОе. Анализ рефлектограмм показал, что в образце Co(12 Å)/Dy(12 Å) сплошного слоя Co не образуется, а магнитные моменты в сплаве CoDy ориентированы перпендикулярно поверхности. В образце Co(30 Å)/Dy(12 Å) частично образуется сплошной слой Co, магнитные моменты в котором лежат в плоскости образца, в то время как намагниченность CoDy слоя ориентирована вдоль нормали к поверхности. Таким образом, можно утверждать, что перпендикулярная магнитная анизотропия в сверхрешетках Co/Dy формируется в слоях сплава CoDy, в то время как магнитные моменты в слоях Co лежат в плоскости образца.

4. Заключение

Нами установлено, что сверхрешетки Co/Dy представляют собой композиционно-модулированный сплав, в котором, с одной стороны, выдерживается строгая периодичность в толщинах и композиции слоев, а с другой стороны, интердиффузия Co и Dy на межслойных границах приводит к периодическому изменению с глубиной концентрации Co и Dy. Показано, что перпендикулярная магнитная анизотропия в Co/Dy обусловлена перпендикулярной ориентацией намагниченности в слоях CoDy, в то время как намагниченность слоев Co ориентирована в плоскости образца.

Благодарности

Синтез образцов, магнитометрические и рентгеноструктурные измерения выполнены в Центре коллективного пользования ИФМ УрО РАН. Эксперименты по рефлектометрии поляризованных нейтронов выполнены на инструменте NREX, действующем на стационарном реакторе FRM-II в Heinz Maier-Leibnitz Center (Гархинг, Германия), который используется Институтом Макса Планка по физике твердого тела (Штутгарт, Германия).

Финансирование работы

Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема „Спин“ № АААА-А18-118020290104-2) при частичной поддержке РФФИ (проекты № 20-42-660024 и 19-02-00057).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Z.S. Shan, D.J. Sellmyer, S.S. Jaswal, Y.J. Wang, J.X. Shen. Phys. Rev. Lett. **63**, 449 (1989).
- [2] Z.S. Shan, D.J. Sellmyer. Phys. Rev. B **42**, 10433 (1990).
- [3] Z.S. Shan, D.J. Sellmyer, S.S. Jaswal, Y.J. Wang, J.X. Shen. Phys. Rev. B **42**, 10446 (1990).
- [4] I.A. Subbotin, E.M. Pashaev, A.L. Vasiliev, Yu M. Chesnokov, G.V. Prutskov, E.A. Kravtsov, M.V. Makarova, V.V. Proglyado, V.V. Ustinov. Physica B **573**, 28 (2019).

Редактор Т.Н. Василевская