

УДК 537.622.6,539.216.2

МАГНИТНАЯ СТРУКТУРА ПЛАНАРНЫХ НАНОГЕТЕРОСТРУКТУР Dy/Co ПРИ КОМНАТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

© 2021 г. М. В. Макарова^{a, b, *}, Е. А. Кравцов^{a, b}, А. О. Павлова^a,
В. В. Устинов^b, Ю. Хайдуков^{c, d}

^aИнститут физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, 620137 Россия

^bУральский федеральный университет, Екатеринбург, 620002 Россия

^cИнститут физики твердого тела общества Макса Планка, Штутгарт, 70569 Германия

^dНаучно-исследовательский институт ядерной физики им. Скобельцина,
Московского государственного университета, Москва, 119234 Россия

*e-mail: makarova@imp.uran.ru

Поступила в редакцию 24.12.2020 г.

После доработки 22.02.2021 г.

Принята к публикации 22.02.2021 г.

Магнитная структура композиционно-модулированных пленок Dy/Co исследовалась взаимодополняющими магнитометрическими методами, магнитной силовой микроскопии и рефлектометрии поляризованных нейтронов при комнатной температуре. Установлено, что перпендикулярная магнитная анизотропия в сверхрешетках обусловлена перпендикулярной ориентацией магнитных моментов в переходных областях Dy/Co вблизи межслойных границ, в то время как магнитные моменты слоев Co лежат в плоскости образца.

Ключевые слова: металлические магнитные сверхрешетки, редкоземельные металлы, перпендикулярная магнитная анизотропия, рефлектометрия поляризованных нейтронов, магнитная силовая микроскопия.

DOI: 10.31857/S1028096021080094

ВВЕДЕНИЕ

Многослойные магнитные наноструктуры – искусственные магнетики, которые находят применение во многих областях современной микро- и наноэлектроники, например, в системах хранения и записи информации [1–4]. В последнее время растет интерес к многослойным магнитным наноструктурам, образованным чередующимися слоями переходных *3d*-металлов и тяжелых редкоземельных металлов [5–7]. Одна из причин, по которой многослойные структуры редкоземельный металл/переходный металл (РЗМ/ПМ) привлекают к себе внимание исследователей, состоит в том, что данные объекты могут обладать перпендикулярной магнитной анизотропией (ПМА). Наиболее характерные представители данного класса веществ: Gd/Fe, Tb/Co, Ho/Co и Dy/Co. Электронная оболочка тяжелых РЗМ (Dy, Tb) имеет сильно анизотропный характер. Это обуславливает существенное различие в уровне локальной магнитной анизотропии редкоземельных компонентов, что определяет особенности магнитной структуры, эффективной магнитной анизотропии, магнитного гистерезиса, доменной структуры и возможных сфер

применения аморфных пленок. Для аморфных РЗМ/ПМ-соединений, содержащих тяжелые редкоземельные элементы, характерен, как правило, коллинеарный ферримагнетизм [1]. Причем (в отличие от кристаллических ферримагнетиков) аморфным сплавам присуще непрерывное изменение величин подрешеточных намагниченностей в зависимости от состава. Многослойные РЗМ/ПМ менее изучены, на данный момент имеется только несколько работ 90-х годов по исследованию многослойных структур Dy/Co [2, 3]. Одним из главных факторов, влияющих на формирование магнитных свойств подобных систем, является структурное состояние слоев, в особенности их границ и интерфейсов. Недавно мы показали, что перпендикулярная магнитная анизотропия наблюдается в структурах Dy(*x* нм)/Co(*y* нм), где *x* = 12, 20 нм, *y* = 12.30 нм при температуре 80–90 К [4, 5]. Но для практического использования важно, чтобы ПМА наблюдалась при комнатной температуре.

В цели данной работы входило подробное исследование магнитных свойств сверхрешеток Co/Dy, определение влияния толщины слоя Co

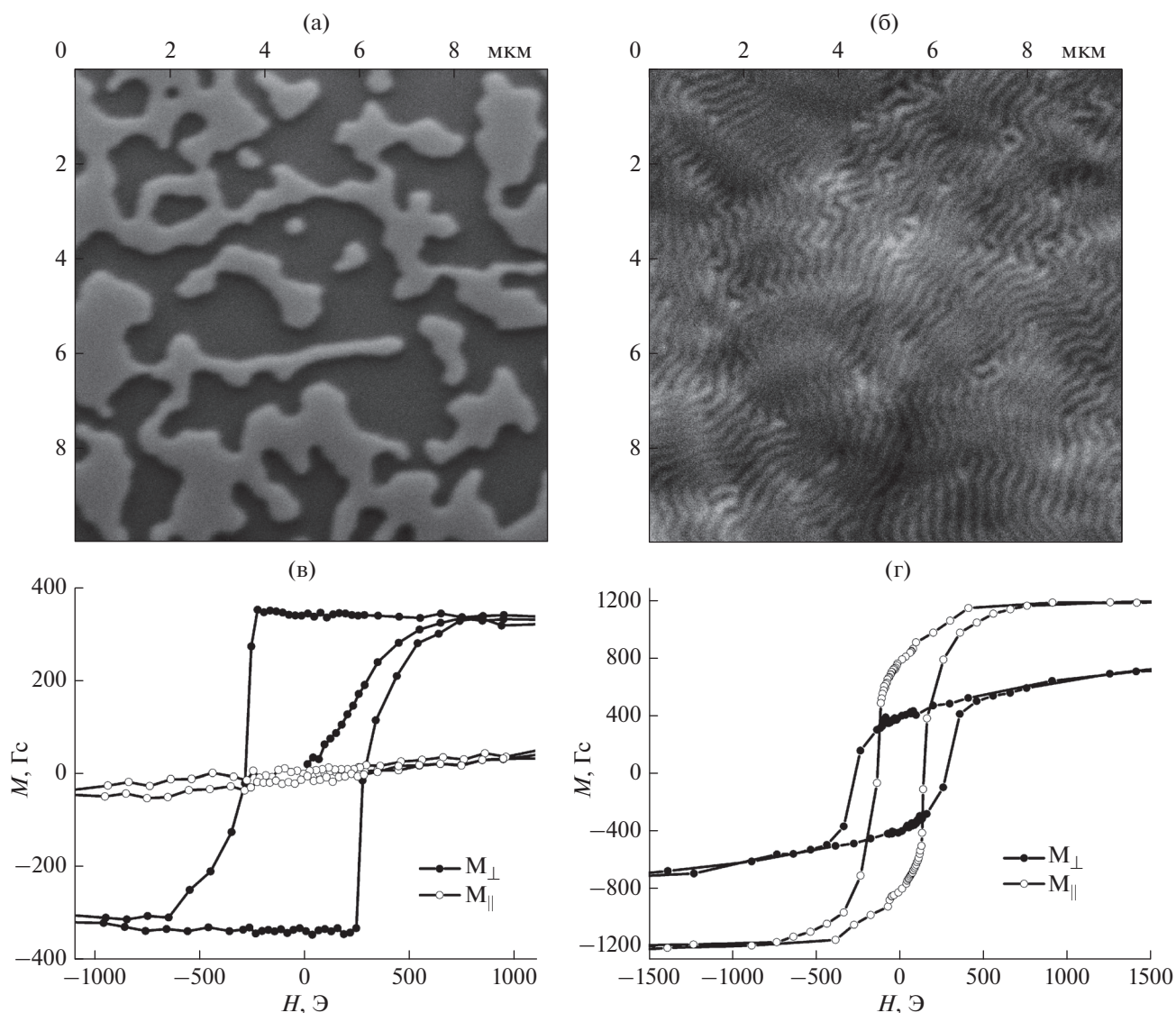


Рис. 1. Магнитный рельеф поверхностей образцов: а – Dy(1.2 нм)/Co(1.2 нм) и б – Dy(1.2 нм)/Co(3.0 нм). Зависимости намагниченности от внешнего магнитного поля, приложенного вдоль нормали к поверхности образца при температуре 300 К: в – Dy(1.2 нм)/Co(1.2 нм) и г – Dy(1.2 нм)/Co(3.0 нм).

на магнитную анизотропию и профили намагниченности при комнатной температуре.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В данной статье представлены исследования, проведенные на двух сверхрешетках: [Dy(1.2 нм)/Co(1.2 нм)]₄₀ и [Dy(1.2 нм)/Co(3.0 нм)]₄₀. Образцы были изготовлены методом высоковакуумного магнетронного распыления на монокристаллических подложках (001)Si. Рост проводился при комнатной температуре. Сначала на подложку наносили буферный слой Nb толщиной 7.0 нм, необходимый для “сглаживания” шероховатости подложки и предотвращения образования силицидов. На буферный слой напыляли сверхрешет-

ку, начиная со слоя Dy. После завершения роста (для защиты от окисления) на структуру наносили слой Al толщиной 10.0 нм.

Магнитные измерения проводили на вибрационном магнитометре Lake Shore 7407 во внешнем магнитном поле до 17 кЭ, которое прикладывалось как перпендикулярно, так и в плоскости образца. Доменную структуру изучали с помощью сканирующего зондового микроскопа Solver Next в режиме магнитной силовой микроскопии (MCM). Сканирование производили зондами MFM10 с CoCr-покрытием и радиусом 40 нм по двухпроходной полуконтактной методике. Определялось изменение фазы колебаний зонда под действием магнитных сил поверхности образца, что и реги-

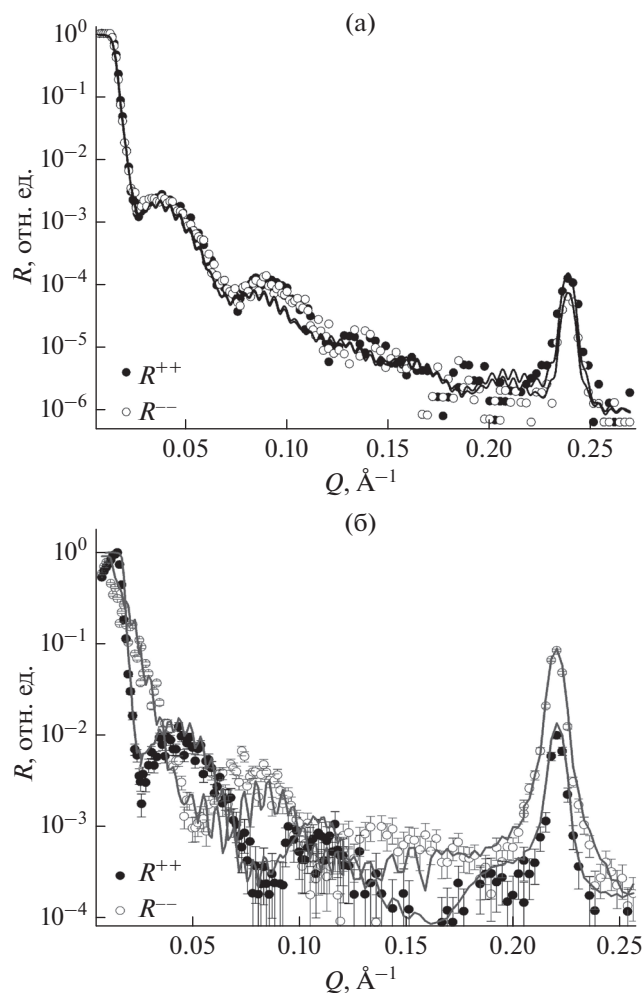


Рис. 2. Рефлектометрические кривые (символы) и результаты их обработки (сплошные линии), измеренные в магнитном поле 1.5 кОе при температуре $T = 300$ К для сверхрешетки $\text{Dy}(1.2 \text{ нм})/\text{Co}(1.2 \text{ нм})$ (а), для сверхрешетки $\text{Dy}(1.2 \text{ нм})/\text{Co}(3.0 \text{ нм})$ (б).

стрировалось в качестве МСМ-изображения. Измерения рефлектометрии поляризованных нейтронов проводили в стандартной геометрии $\theta-2\theta$ на рефлектометре NREX на исследовательском реакторе FRM II. Измерения с полным поляризационным анализом проведены на длине волны $4.26 \pm 0.06 \text{ \AA}$, эффективность поляризатора была 99.99%, анализатора – 98%.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Ранее 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 грани-

цах приводит к периодическому изменению с глубиной концентрации Co и Dy [4, 5]. Исследования, проведенные с помощью рентгеновской дифракции в геометрии скользящего падения [5], показали, что в образце $\text{Dy}(1.2 \text{ нм})/\text{Co}(1.2 \text{ нм})$ присутствует интерметаллид DyCo_3 . Второй образец $\text{Dy}(1.2 \text{ нм})/\text{Co}(3.0 \text{ нм})$ представляет собой аморфный сплав Dy-Co и сплошной слой Co .

Картинки магнитного рельефа, полученные с помощью сканирующего зондового микроскопа, показаны на рис. 1. Сканирование проводилось в направлении нормали к поверхности образца. На картине с равным содержанием Dy и Co присутствует ярко выраженный контраст (рис. 1а), который можно назвать лабиринтной магнитной структурой. Данные мелкомасштабные колебания нормальной составляющей намагниченности являются микроразмерными доменами. В образце $\text{Dy}(1.2 \text{ нм})/\text{Co}(1.2 \text{ нм})$ средний размер магнитных неоднородностей не превышает 4 мкм. Вид кривой намагничивания для образца указывает на наличие сильной одноосной магнитной анизотропии перпендикулярно плоскости пленки. ПМА при комнатной температуре объясняется наличием интерметаллида DyCo_3 [5], температура Кюри которого равна 450 К. Увеличение толщины слоев Co приводит к увеличению поля насыщения и уменьшению размера доменной структуры (рис. 1б), наблюдается полосовая доменная структура на слое кобальта субмикронного размера. Так как Dy при $T = 300$ К парамагнетик, то ожидалось, что петля гистерезиса будет прямоугольной, однако это не выполняется. Данный результат можно интерпретировать следующим образом: магнитная анизотропия не является одноосной, как в образце $\text{Dy}(1.2 \text{ нм})/\text{Co}(1.2 \text{ нм})$, поскольку присутствует как сплав Dy-Co , так и сплошной слой Co . При проведении эксперимента методом рефлектометрии поляризованных нейтронов измерялись четыре коэффициента отражения нейтронов в зависимости от переданного импульса: две зависимости без переворота спина (R^{++} и R^{--}) и две с переворотом спина (R^{+-} и R^{-+}). Измерения проводились при $T = 300$ К в магнитном поле $H = 1500$ Э (рис. 2а, 2б). Сигнала спин-флип рассеяния не наблюдалось для обоих образцов.

Результаты нейтронных экспериментов хорошо согласуются с магнитометрическими результатами, описанными выше. Следует подчеркнуть, что намагниченность в слоях неоднородна из-за разного содержания атомов Co . В $\text{Dy}(1.2 \text{ нм})/\text{Co}(1.2 \text{ нм})$ подрешетки Dy и Co ориентированы антиферромагнитно относительно друг друга и перпендикулярно плоскости образца. Магнитные моменты первого и второго слоя равны $0.2 \pm 0.1 \mu_B/\text{атом}$. В $\text{Dy}(1.2 \text{ нм})/\text{Co}(3.0 \text{ нм})$ магнитные моменты Dy и Co упорядочены антипараллельно

друг другу и перпендикулярно плоскости пленки в слое сплава Dy–Co и равны $2.2 \pm 0.1 \mu_B/\text{атом}$. Магнитные моменты слоя Co ориентированы вдоль плоскости образца $m = 1.7 \pm 0.1 \mu_B/\text{атом}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены комплексные экспериментальные исследования сверхрешеток Dy(x нм)/Co(y нм), где $x = 12.20$ нм, $y = 12.30$ нм, синтезированных методом магнетронного распыления. Приведены результаты комбинированных магнитометрических и нейтронографических исследований сверхрешеток Dy/Co, выполненные при комнатной температуре. В сверхрешетках наблюдается перпендикулярное упорядочение магнитных моментов Dy и Co в слоях Dy/Co. Установлено, что перпендикулярная магнитная анизотропия в сверхрешетках обусловлена магнитными свойствами переходных слоев Dy/Co, в то время как магнитные моменты слоев Co ориентированы 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).

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Majkrzak C.F., Kwo J., Yng M., Yafet Y., Gibbs D., Chen C.L., Bohr J.* // *Adv. Phys.* 1991. V. 40. № 2. P. 99. <https://doi.org/10.1080/00018739100101482>
2. *Heinrich B., Bland J.A.C.* (Eds.) *Ultrathin Magnetic Structures V. I–IV.* Berlin: Springer, 2005. <https://doi.org/9783540219569>
3. *Scheunert G., Heinonen O., Hardeman R., Lapicki A., Gubbins M., Bowman R.M.* // *Appl. Phys. Rev.* 2016. V. 3. P. 011301. <https://doi.org/10.1063/1.4941311>
4. *Mangin S., Gottwald M., Lambert C.-H., Steil D.* // *Nature Materials.* 2014. V. 13. P. 286. <https://doi.org/10.1038/NMAT3864>
5. *Chen K, Lott D., Radu F.* // *Scientific Reports.* 2015. P. 18377. <https://doi.org/10.1038/srep18377>
6. *Haskel D., Srajer G., Lang J.C., Pollmann J., Nelson C.S., Jiang J.S., Bader S.D.* // *Phys. Rev. Lett.* 2001. V. 87. P. 207201. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.96.239901>
7. *Андреевко А.С., Никитин С.А.* // *УФН.* 1997. Т. 167. С. 605.2. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0167.199706b.0605>
8. *Shan Z.S., Sellmyer D.J.* // *Phys. Rev. B.* 1990. V. 42. № 16. P. 10433. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.42.10433>
9. *Shan Z.S., Sellmyer D.J., Jaswal S.S., Wang Y.J., Shen J.X.* // *Phys. Rev. Letters.* 1989. V. 63. № 4. P.443. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.6.449>
10. *Subbotin I.A., Pashaev E.M., Vasiliev A.L., Chesnokov Yu.M., Prutskov G.V., Kravtsov E.A., Makarova M.V., Proglyado V.V., Ustinov V.V.* // *Physica B.* 2019. V. 573. P. 28. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2019.06.044>
11. *Макарова М.В., Кравцов Е.А., Проглядю В.В., Хайдуков Ю.Н., Устинов В.В.* // *ФТТ.* 2020. Т. 62. № 9. С. 1499. <https://doi.org/10.21883/FTT.2020.09.49776.15H>

Magnetic Structure Planar Nanoheterostructures Dy/Co at Room Temperature

M. V. Makarova^{1, 2, *}, E. A. Kravtsov^{1, 2}, A. O. Pavlova¹, V. V. Ustinov¹, Yu. Khaydukov^{3, 4}

¹*Institute of Metal Physics, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, 620137 Russia*

²*Ural Federal University, Ekaterinburg, 620002 Russia*

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

⁴*Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow State University, Moscow, 119234 Russia*

*e-mail: makarova@imp.uran.ru

The magnetic structure of composition-modulated films Dy/Co was investigated by complementary methods VSM-magnetometry, MFM and polarized neutron reflectometry at room temperature. The perpendicular magnetic anisotropy in superlattices is shown to be due to the perpendicular orientation of the magnetic moments in the DyCo transition regions near the interlayers, while the magnetic moments of the Co layers is orientation in the sample plane.

Keywords: metal magnetic superlattices, perpendicular magnetic ordering, polarized-neutron reflectometry, magnetic force microscopic.