Письма в ЖЭТФ, том 109, вып. 5, с. 325 – 330

Влияние полупроводниковой прослойки на эффект положительного обменного смещения в трехслойной структуре CoNi/Si/FeNi

Г. С. Патрин[+*1)], *И. А. Турпанов*[+], *В. И. Юшков*[+*], *А. В. Кобяков*[+*], *К. Г. Патрин*[+], *Г. Ю. Юркин*[+], *Я. А. Живая*[+]

[+]*Сибирский федеральный университет, 660041 Красноярск, Россия*

[*]*Институт физики им. Л. В. Киренского Федеральный исследовательский центр Красноярский научный центр Сибирского отделения РАН, 660036 Красноярск, Россия*

Поступила в редакцию 21 сентября 2018 г.
После переработки 14 декабря 2018 г.
Принята к публикации 25 декабря 2018 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований пленок в системе магнитожесткий ферромагнетик (CoNi) – магнитомягкий ферромагнетик (FeNi), взаимодействующих через немагнитную полупроводниковую прослойку кремния (Si). Проведены температурные и полевые исследования магнитных свойств пленочных структур с различными толщинами кремния. Обнаружено, что многослойная структура наряду со свойствами, присущими магнитным пружинам, проявляет эффект положительного обменного смещения, зависящим от толщины кремния.

DOI: 10.1134/S0370274X19050084

Наномагнитные материалы в силу специфики своего строения обладают набором необычных свойств [1], что вызывает к ним интерес, как в плане фундаментальных исследований, так и в плане возможных практических применений. Слоистые структуры с разными магнитными слоями наноразмерного масштаба в различных сочетаниях являются наиболее удобными объектами для устройств спинтроники, в частности, это пленочные системы, состоящие из чередующихся слоев магнитомягкого и магнитожесткого материалов. Межслоевое взаимодействие в таких системах является ответственным за формирование магнитного состояния. В случае, когда имеет место сопряжение ферромагнитного и антиферромагнитного слоев, как правило, реализуется эффект обменного смещения [2] и весь наблюдаемый процесс намагничивания связан с поведением ферромагнитного слоя. Когда сопрягаются ферромагнитные магнитомягкий и магнитожесткий слои может возникать новое состояние, типа "магнитной пружины". В этом случае процесс намагничивания проходит через определенные стадии, и петля гистерезиса имеет характерную ступенчатую форму [1].

Изначально такие системы изучались в связи с исследованием многокомпонентных постоянных магнитов [3]. Затем были изучены особенности намагничивания слоисто-неоднородных структур в зависимости от толщины магнитомягкого и магнитожесткого слоев, межслоевого взаимодействия и анизотропии слоев [4–6] применительно к проблемам спинтроники. В дальнейшем в целях улучшения свойств пленочных постоянных магнитов для увеличения плотности энергии $(BM)_{max}$ были созданы трехслойные структуры путем введения магнитомягкого слоя в качестве промежуточного слоя между двумя магнитожесткими слоями $Nd_2Fe_{14}B/Fe/Nd_2Fe_{14}B$ [7] и $SmCo_5/Fe/SmCo_5$ [8].

Также структуры типа "магнитная пружина" изучались в качестве среды для перпендикулярной магнитной записи как теоретически в двухслойных ферромагнитных структурах [9], так и экспериментально в трехслойных ферримагнитных структурах $FePt/Fe_3Pt/FePt$ [10] и $DyCo_5/Ta/Fe_{76}Gd_{24}$ [11]. Эффекты влияния магнитного поля на проводимость исследовались в структурах SmCo/FeNi [12], где наблюдалось магнитосопротивление ($\sim 1.5\,\%$). Здесь основной вклад в эффект дает анизотропное магнитосопротивление в магнитомягком слое. В сверхрешетках $[DyFe_2/YFe_2]_n$ обнаружен эффект гигантского магнитосопротивления $\sim 32\,\%$ [13], что представляется уже весьма перспективным для практики.

В ряде пленочных структур наблюдались новые проявления. В структурах с ферримагнитными слоями $FeGd_{ferri}/FeSn_{ferro}$ или $FeGd_{ferri}/FeTb_{ferri}$ [14] наряду с эффектом магнитной пружины проявляют-

1)e-mail: patrin@iph.krasn.ru

ся эффекты положительного или отрицательного обменного смещения, соответственно. В структуре Co/NiO реализуется состояние антиферромагнитной магнитной пружины [15]. А в многослойных структурах $[(CoP)_{soft}/NiP/(CoP)_{hard}/NiP]_n$ (NiP – немагнитный) обнаружено изменение формы петли намагничивания и осцилляция поля насыщения в зависимости от числа структурных блоков (n) [16].

Для управления межслоевым взаимодействием, как определяющего параметра при создании структур типа магнитной пружины с заданными характеристиками, предпринимаются попытки внедрения между магнитными слоями дополнительных прослоек. В этом направлении число работ весьма ограничено. Установлено, что в структуре CoNi/Gd/CoNi [17] взаимодействие между слоями CoNi сильно зависит от толщины гадолиния. В многослойной структуре $FM_{hard}/NM/\alpha\text{-}Fe/NM/FM_{hard}$ ($FM_{hard} = RE_{16}Fe_{71}B_{13}$, RE = Nd, Pr; NM = Mo, Cu, Cr) [18] проявляется дальнодействующий характер взаимодействия, что определяется по существенной зависимости обменной длины (L_{ex} [19]) от толщины немагнитной металлической прослойки.

Именно изучению возможностей управления свойствами структур типа магнитная пружина путем изменения межслоевого взаимодействия между магнитожесткими и магнитомягкими слоями, влияния анизотропии и внешних воздействий посвящено данное сообщение.

Методика эксперимента. Методом ионно-плазменного распыления впервые синтезированы пленки композиции CoNi/Si/FeNi (базовый вакуум составлял 10^{-7}–10^{-8} мм.рт.ст.). Содержания никеля в слое CoNi составляло 19.5 ат. %, а в слое FeNi было 83 ат. %. Толщина слоя CoNi составляла $t_h = 53$ нм и выбиралась из соображений, чтобы он проявлял свойства магнитожесткого слоя при измерениях в доступных магнитных полях. Толщина магнитомягкого слоя FeNi была $t_s = 72$ нм, и в нем могло реализоваться закручивание намагниченности этого слоя. При напылении слоя CoNi для лучшей адгезии с подложкой и наведения одноосной анизотропии температура подложки была 450 K, затем подложка охлаждалась до 373 K. Слой кремния и слой пермаллоя напылялись при этой температуре подложки, чтобы исключить (минимизировать) образование силицидов. Скорость осаждения слоев была $v \approx 0.15$ нм/с.

Отношение величин магнитных анизотропий магнитожесткого и магнитомягкого материалов при комнатной температуре составляет около 2 порядков [20], которое при понижении температуры только растет. Толщина немагнитного полупроводникового слоя была переменной и менялась в диапазоне $t_{Si} = 0-15$ нм. Толщины слоев определялись методами рентгеновской спектроскопии. Измерения намагниченности проводились на установке MPMS-XL в диапазоне температур от гелиевой до комнатной. Электронно-микроскопические исследования поперечного среза были выполнены на электронном микроскопе JEOL JEM-2100 (при подготовке образца на установке Gatan PIPS) и показали наличие отчетливой границы раздела между слоем кремния и обоими магнитными слоями (рис. 1). Наличие следов фаз си-

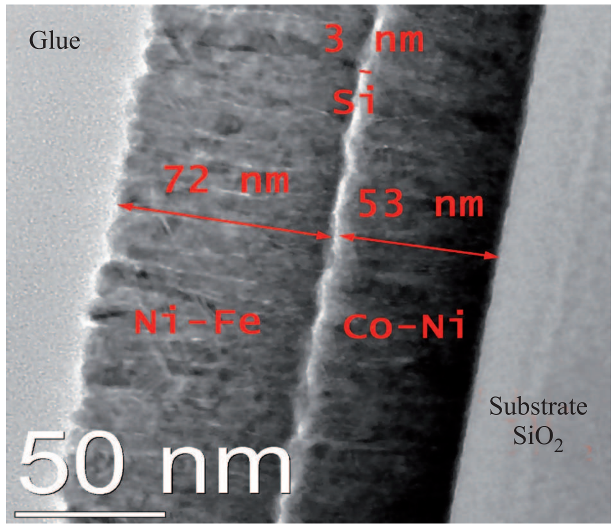

Рис. 1. (Цветной онлайн) Поперечный срез для пленки CoNi/Si/FeNi

лицидов не обнаружено. Также было получено, что пленка CoNi была поликристаллической и находилась в гексагональной фазе. Для наведения оси магнитной анизотропии напыление и последующее охлаждение происходило в магнитном поле (≈ 200 Э). В дальнейшем все измерения проводились для направления внешнего магнитного поля вдоль этой наведенной легкой оси. Процедура измерения была стандартной. После охлаждения в "отрицательном" магнитном поле ($-H_S$) проводилось измерение по циклу: $-H_S \rightarrow +H_S \rightarrow -H_S$. Поле обменного смещения обычно определяется как $H_E = (H_{C2} + H_{C1})/2$, (см. рис. 2c) где H_{C1} и H_{C2} коэрцитивные поля перемагничиваемого контрольного слоя (в случае структуры ферромагнетик/антиферромагнетик (ФМ/АФМ) это будет ферромагнитный слой).

Результаты и обсуждение. В качестве первого шага были выполнены измерения намагниченности (M(H)) исходных реперных пленок CoNi и FeNi. На рисунке 2 приведены петли гистерезиса магнито-

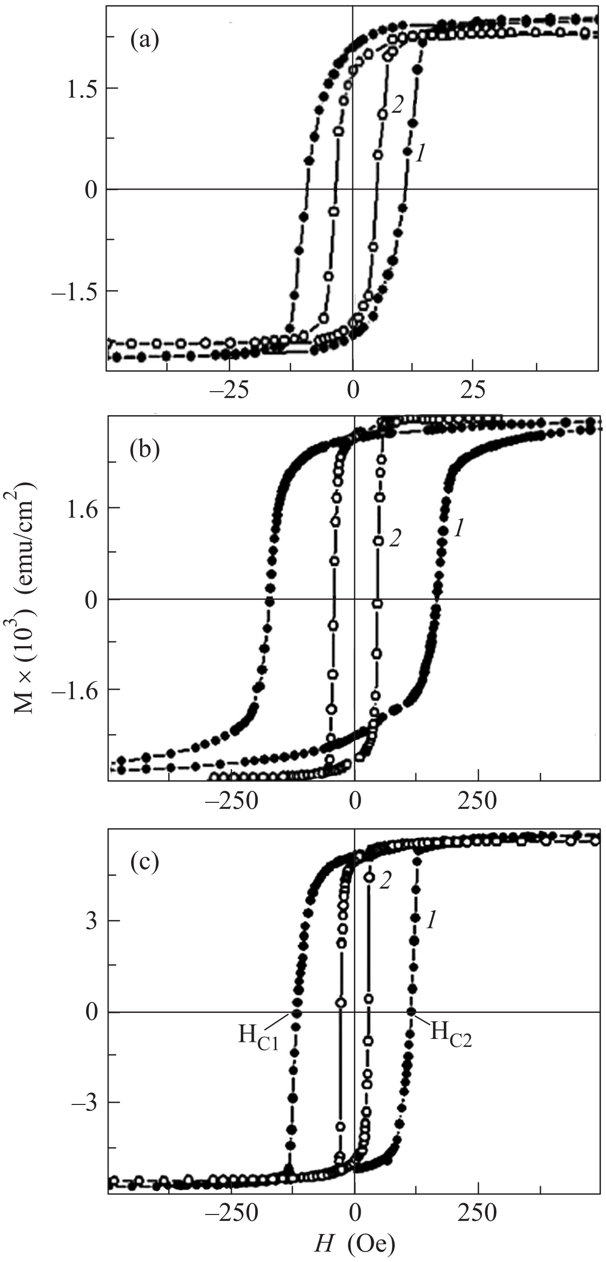

Рис. 2. Полевые зависимости магнитного момента единицы поверхности пленок: (a) – FeNi; (b) – CoNi; (c) – CoNi/FeNi. *1* – $T = 20$; *2* – $T = 250$ K

мягкого (рис. 2a) и магнитожесткого (рис. 2b) слоев, указанных выше толщин, при разных температурах. Видно, что коэрцитивные силы пленок сильно различается, что говорит о заметном отличии их магнитных анизотропий ($H_c = 2 \cdot K/(M_S \cdot \gamma(\theta))$ [21], $\gamma(\theta)$ – параметр, зависящий от угла θ между легкой осью и направлением магнитного поля; все остальные обозначения традиционные. В образованной бислойной структуре CoNi/FeNi (рис. 2c) при данных толщинах слоев кривая намагниченности симметричная и соответствует ферромагнитному поведению. Здесь видно, что имеет место взаимное влияние слоев, при этом коэрцитивная сила двухслойной пленки меньше, чем у одиночного магнитожесткого слоя. Такое поведение характерно для сильной ферромагнитной межслоевой связи [4] и, в случае намагничивания путем вращения намагниченности магнитомягкого слоя, соответствует поведению магнитной пружины [5].

Когда магнитожесткий и магнитомягкий слои сопрягаются через немагнитную прослойку полупроводникового кремния (t_{Si}), то появляется зависимость формы петли намагничивания от толщины слоя Si (см. рис. 3). Во всех исследованных пленках наблюдается двух ступенчатая петля гистерезиса.

На рисунке 3 приведены зависимости намагниченности от магнитного поля при разных температурах при намагничивании вдоль легкой оси. Как видно из этого рисунка, при увеличении толщины прослойки до значения $t_{Si} = 5$ нм коэрцитивная сила обменно-связанной трехслойной структуры, определяемая как $H_C = (H_{C2} - H_{C1})/2$), уменьшается, а затем вновь наблюдается ее увеличение. Для пленок с немагнитной прослойкой кривые M(H) по форме соответствуют поведению намагниченности, характерной для магнитной пружины с умеренной межслоевой связью. Прослеживается одна особенность. Получено, что для пленок с толщинами $t_{Si} = 2.75$, 3.5 и 5.75 нм при низких температурах наблюдается "положительное смещение" петель, тогда как для толщины $t_{Si} = 1.2$ нм петля является симметричной относительно отражения начала координат в системе M–H, т.е. обменное смещение отсутствует. При повышении температуры эффект смещения петель уменьшается, при $T \geq 100$ K он исчезает совсем (рис. 4).

Для систем ферромагнетик/антиферромагнетик, как правило, наблюдается эффект "отрицательного" обменного смещения ($H_E < 0$). Однако, для структуры $Tb_x(Fe_{80}Co_{20})_{100-x}$(200 нм)/$Tb_{16.2}(Fe_{80}Co_{20})_{83.8}$ (100 нм) (пиннингующий слой) [22], которая относится к случаю (FM/FM), в зависимости от содержания редкой земли (x) может реализоваться либо отрицательное, либо положительное обменное смещение. При антиферромагнитном взаимодействии подсистем эффект здесь определяется тем, какая подсистема $3d$- или $4f$-элементов в слое является определяющей. Также эффект обменного смещения наблюдался в системе двух ферримагнитных шпинельных диэлектрических слоев [23]. Здесь важным является то, что имеет место сильное

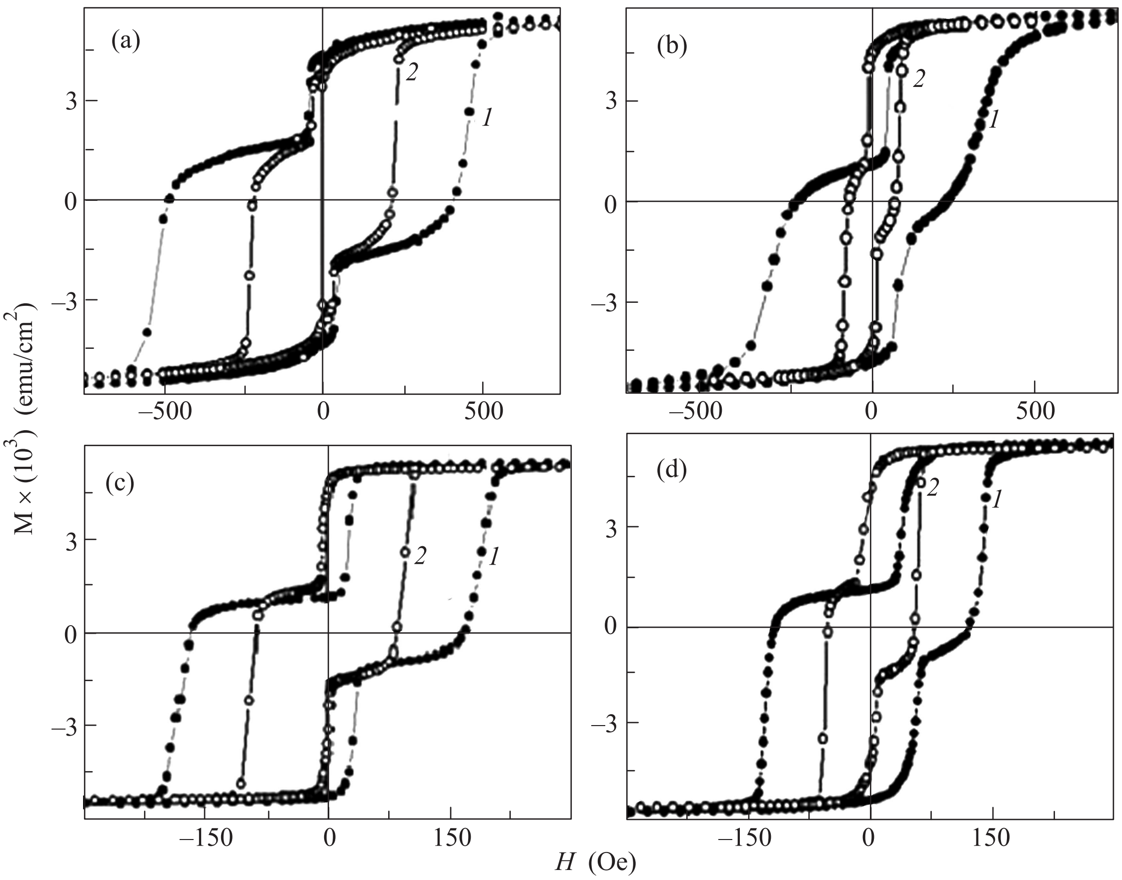

Рис. 3. Полевые зависимости магнитного момента единицы поверхности пленок CoNi/Si/FeNi. (a) – $t_{Si} = 1.25$ нм; (b) – $t_{Si} = 2.75$ нм; (c) – $t_{Si} = 3.5$ нм; (d) – $t_{Si} = 5.75$ нм. *1* – $T = 40$ K; *2* – $T = 250$ K

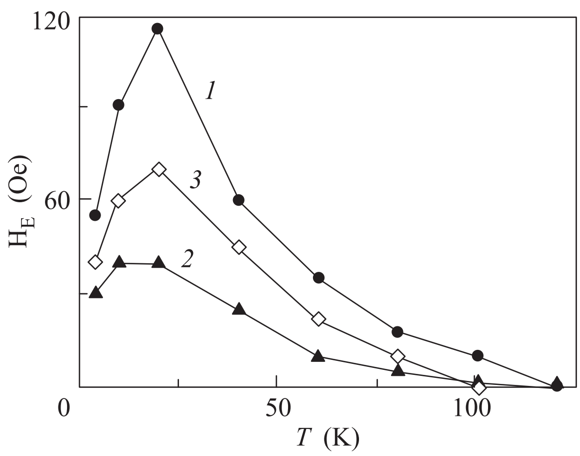

Рис. 4. Температурные зависимости поля обменного смещения пленок CoNi/Si/FeNi. *1* – $t_{Si} = 2.75$ нм; *2* – $t_{Si} = 3.5$ нм; *3* – $t_{Si} = 5.75$ нм

межслоевое взаимодействие, сравнимое с внутрислоевым взаимодействием. Это указывает на наличие сильного интерфейсного взаимодействия.

Как правило [24], эффект положительного обменного смещения ($H_E > 0$) реализуется в системах, когда охлаждение происходит в отрицательном магнитном поле ($h_f < 0$) и положительном межслоевом взаимодействии ($J > 0$) при условии $(J \cdot S_{AF}) < 0$ (с учетом направления спина в AF), либо в случае, когда $h_f > |J \cdot S_{AF}|$, но межслоевой обмен отрицательный ($J < 0$).

В нашем случае, когда оба слоя являются ферромагнитными, мы наблюдаем зависимость величины положительного обменного смещения, определяемое как смещение части петли (которую можно отнести к магнитомягкому слою) от толщины немагнитного полупроводникового слоя. А это значит, что наряду с влиянием полупроводникового слоя на величину межслоевого взаимодействия наблюдается зависимость знака этого взаимодействия от толщины кремниевой прослойки. На рисунке 4 видно, что величина обменного смещения показывает немонотонный характер в зависимости от толщины полупроводниковой прослойки. При этом двухступенчатое поведение, характерное для магнитной пружины с умеренным межслоевым взаимодействием сохраняется для всех толщин прослоек. Следует также отметить, что величина положительного обменного смещения коррелирует с шириной магнитожесткой ступеньки. Такое поведение дает основание считать, что межслоевое взаимодействие носит знакопеременный характер и там, где оно отрицательное, имеет место положительное смещение петли намагничивания. Подобное поведение наблюдалось в структуре $(Pt/Co)_3/NiO/(Co/Pt)_3$ [25], там период осцилляций составляет два монослоя NiO. Это возможно, если магнитный слой взаимодействует ферромагнитно с интерфейсным слоем антиферромагнитной прослойки NiO. Для многослойных пленок с немагнитными полупроводниковыми прослойками, в частности, для структуры с кремниевой прослойкой Fe/Si/Fe [26], имеет место антиферромагнитное межслоевое взаимодействие с кривой апериодического типа в зависимости от толщины прослойки.

Получено (рис. 4), что температурная зависимость H_E имеет максимум в области ≈ 20 K. Это указывает либо на конкурирующий характер механизмов, определяющих эффект обменного смещения, либо на активационный механизм, ответственный за формирование магнитного состояния. Поскольку дополнительных операций по подготовке эффекта обменного смещения мы не проводили, а анизотропия наводилась только во время напыления пленок, то, по-видимому, формируется несимметричный двух минимумный потенциал, относительно поворота вектора намагниченности. Ситуация в какой-то мере подобна суперпарамагнетизму ансамбля одноосных частиц с магнитной энергией типа $E = -K \cdot \cos^2\theta - M \cdot H \cdot \cos\theta$ (поле вдоль легкой оси анизотропии). Здесь основным настраиваемым по температуре параметром является константа анизотропии. В нашем случае добавляется и играет важную роль межслоевое обменное взаимодействие $-\lambda \cdot M_{\mathrm{hard}} \cdot M_{\mathrm{soft}} \cdot \cos(\theta_{\mathrm{hard}} - \theta_{\mathrm{soft}})$ через прослойку кремния, где обе намагниченности являются функциями внешнего магнитного поля. Знак константы λ будет определять направление смещения кривой намагничивания.

В заключение отметим основные результаты настоящего исследования.

○ В системе магнитожесткий-магнитомягкий материал с полупроводниковой прослойкой создана структура с управляемым межслоевым взаимодействием.

○ Межслоевое взаимодействие зависит от толщины полупроводниковой прослойки.

○ Обнаружен эффект положительного обменного смещения.

Настоящие исследования ведутся при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант # 18-02-00161-а).

1. S. D. Bader, Rev. Mod. Phys. **78**, 1 (2006).
2. J. Nogues, J. Sort, V. Langlais, V. Skumryev, S. Surinach, J. S. Munoz, and M. D. Baro, Phys. Rep. **422**, 65 (2005).
3. J. P. Liu, *Exchange-Coupled Nanocomposite Magnets*, in: *Nanoscale Magnetic Materials and Applications*, ed. by J. P. Liu, E. Fullerton, O. Gutfleish, and D. J. Sellmer, Springer, N.Y. (2009), p. 309.
4. T. Leineweber and H. Kronmuller, Phys. Stat. Sol. (b) **201**, 291 (1997).
5. E. F. Kneller and R. Hawig, IEEE Trans. Magn. **27**, 3588 (1991).
6. D. Suess, JMMM **308**, 183 (2007).
7. C. J. Yang and S. W. Kim, J. Appl. Phys. **87**, 6134 (2000).
8. S. Zawatzki, R. Heller, Ch. Mickel, M. Seifert, L. Schultz, and V. Neu, J. Appl. Phys. **109**, 123922 (2011).
9. R. H. Victora and X. Shen, IEEE Transactions on Magnetics **41**, 537 (2005).
10. D. Suess, T. Schrefl, R. Dittrich, M. Kirschner, F. Dorfbauer, G. Hrkac, and J. Fidler, JMMM **290–291**, 551 (2005).
11. F. Radu, R. Abrudan, I. Radu, D. Schmitz, and H. Zabel, Nature Commun. **3**, 1728 (2012).
12. K. Mibu, T. Nagahama, T. Shinio, and T. Ono, Phys. Rev. B **58**, 6442 (1998).
13. S. N. Gordeev, J.-M. I. Beaujour, G. J. Bowden, P. A. J. de Groot, B. D. Rainford, R. C. C. Ward, M. R. Wells, and A. G. M. Jansen, Phys. Rev. Lett. **87**, 186808 (2001).
14. F. Canet, S. Mangin, C. Bellourd, M. Piecuch, and A. Schul, J. Appl. Phys. **89**, 6916 (2001).
15. A. Scholl, M. Liberati, E. Arenholz, H. Ohldag, and J. Stohr, Phys. Rev. Lett. **92**, 247201 (2004).
16. G. S. Patrin, Ya. Shiyan, K. G. Patrin, and G. Yu. Yurkin, J. Low Temp. Phys. **182**, 73 (2016).
17. B. Altuncevahar and A. R. Koymen, J. Appl. Phys. **89** 6822 (2001).
18. W. B. Cui, W. Liu, W. J. Gong, X. H. Liu, S. Guo, F. Yang, Z. H. Wang, and Z. D. Zhang, J. Appl. Phys. **111**, 07B503 (2012).
19. R. Schafer, *The Magnetic Microstructure of Nanostructured Materials*, in: *Nanoscale Magnetic Materials and Applications*, ed. by J. P. Liu, E. Fullerton, O. Gutfleish, and D. J. Sellmer, Springer, N.Y. (2009), p. 275.

20. *Alloys between 3d elements*, in: *Magnetic Properties of Metals. d-Elements, Alloys and Compounds*, ed. by H. J. P. Wijn, Springer-Verlag, Berlin–Heidelberg (1991), p. 22.
21. B. D. Cullity and C. D. Graham, *Introduction to Magnetic Materials*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey (2009), ch. 9, p. 275.
22. Ch.-Ch. Lin, Ch.-H. Lai, and R.-F. Jiang, J. Appl. Phys. **93**, 6832 (2003).
23. A. Suzuki, R. B. van Dover, E. M. Gyorgy, J. M. Phillips, and R. J. Felder, Phys. Rev. B **53**, 14016 (1996).
24. Ch. Binek, *Tunable Exchange Bias Effects*, in: *Nanoscale Magnetic Materials and Applications*, ed. by J. P. Liu, E. Fullerton, O. Gutfleish, and D. J. Sellmer, Springer, N.Y. (2009), p. 159.
25. Y. Liu and S. Adenwalla, Phys. Rev. Lett. **91**, 037207-1 (2003).
26. G. S. Patrin and O. V. Vas'kovskii, The Phys. Met. Metallograph. **101**, S63 (2006).