Письма в ЖЭТФ, том 107, вып. 9, с. 569 – 573

Магнитный резонанс в многослойных магнитных пружинах $[(\mathrm{CoP})_{\mathrm{soft}}/\mathrm{NiP}/(\mathrm{CoP})_{\mathrm{hard}}/\mathrm{NiP}]_n$

Г. С. Патрин[+*1)], *Я. Г. Шиян*[+*], *К. Г. Патрин*[+], *В. П. Фурдык*[+]

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

[*]*Институт физики им. Л.В. Киренского, ФИЦ КНЦ СО РАН, 660036 Красноярск, Россия*

Поступила в редакцию 20 февраля 2018 г.

После переработки 26 марта 2018 г.

В работе представлены результаты экспериментальных исследований магниторезонансных свойств многослойных пленок $[(\mathrm{CoP})_{\mathrm{soft}}/\mathrm{NiP}/(\mathrm{CoP})_{\mathrm{hard}}/\mathrm{NiP}]_n$ со свойствами магнитных пружин. Обнаружено, что нанесение на магнитный слой $(\mathrm{CoP})_{\mathrm{soft}}$ немагнитного аморфного слоя NiP индуцирует появление интерфейсной перпендикулярной анизотропии. Увеличение числа блоков n в многослойной структуре приводит к появлению третьего пика поглощения, что объясняется образованием неколлинеарной трехподрешеточной магнитной структуры.

DOI: 10.7868/S0370274X18090059

Пленочные системы, состоящие из чередующихся слоев магнитомягкого и магнитожесткого материалов, являются подходящими объектами для решения ряда задач спинтроники. 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 и весь наблюдаемый процесс намагничивания связан с поведением ферромагнитного слоя [1, 2]. Когда сопрягаются ферромагнитные магнитомягкий и магнитожесткий слои возникает новое состояние, типа “магнитной пружины” [3]. Такие структуры изучались сначала в плане улучшения свойств постоянных магнитов [4] и для применения их в качестве среды для перпендикулярной магнитной памяти [5]. Для придания структуре необходимых характеристик, вводили дополнительный промежуточный магнитный слой [6]. В случае, когда межслоевое взаимодействие является регулируемым, например, при введении немагнитной прослойки, есть основание ожидать новых проявлений. Такая попытка была предпринята в многослойной структуре $\mathrm{FM_{hard}}/\mathrm{NM}/\alpha$-$\mathrm{Fe}/\mathrm{NM}/\mathrm{FM_{hard}}$ ($\mathrm{FM_{hard}} = \mathrm{RE_{16}Fe_{71}B_{13}}$, RE = Nd, Pr; NM = Mo, Cu, Cr) [7]. Также имеются эксперименты по изучению процессов намагничивания многослойных магнитных пружин с целью исследования изменения межслоевых взаимодействий при образовании многослойной структуры [8, 9].

Ранее нами было показано [10], что увеличение числа блоков (n) в структуре из ферромагнитных магнитомягкого и магнитожесткого слоев в структуре $[(\mathrm{CoP})_{\mathrm{soft}}/(\mathrm{CoP})_{\mathrm{hard}}]_n$ ведет к усилению влияния магнитомягкого слоя на процесс намагничивания пленочной структуры. Введение немагнитной прослойки приводит к необычному процессу намагничивания пленки, осцилляциям величины коэрцитивной силы. Причем здесь немагнитная прослойка влияет на межслоевое взаимодействие между ферромагнитными слоями. Было получено, что при намагничивании наблюдается поведение типа магнитной пружины, причем эффект проявляется сильнее по мере увеличения числа структурных блоков. Именно изучению изменения магнитного состояния в многослойных пленочных структурах с чередующимися слоями из магнитомягкого и магнитожесткого слоев, разделенных немагнитной прослойкой, при увеличении числа блоков n в структуре, и посвящено данное сообщение.

Детальная процедура получения пленок описана в работе [10]. Пленки $[(\mathrm{CoP})_{\mathrm{soft}}/\mathrm{NiP}/(\mathrm{CoP})_{\mathrm{hard}}/\mathrm{NiP}]_n$ были получены методом химического осаждения. Содержание фосфора во всех слоях составляло 8 % ат. В магнитожестком слое $\mathrm{CoP_{hard}}$ был в гексагональном поликристаллическом состоянии, магнитомягкий слой $\mathrm{CoP_{soft}}$ находился в аморфном состоянии. Соотношение магнитных анизотропий гексагонального и аморфного кобальта превышает два порядка. Промежуточный слой NiP находился в аморфном состоянии и был немагнитный [11]. Были синтезированы пленки $\mathrm{CoP_{soft}}$, $(\mathrm{CoP})_{\mathrm{soft}}/\mathrm{NiP}$ и мно-

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

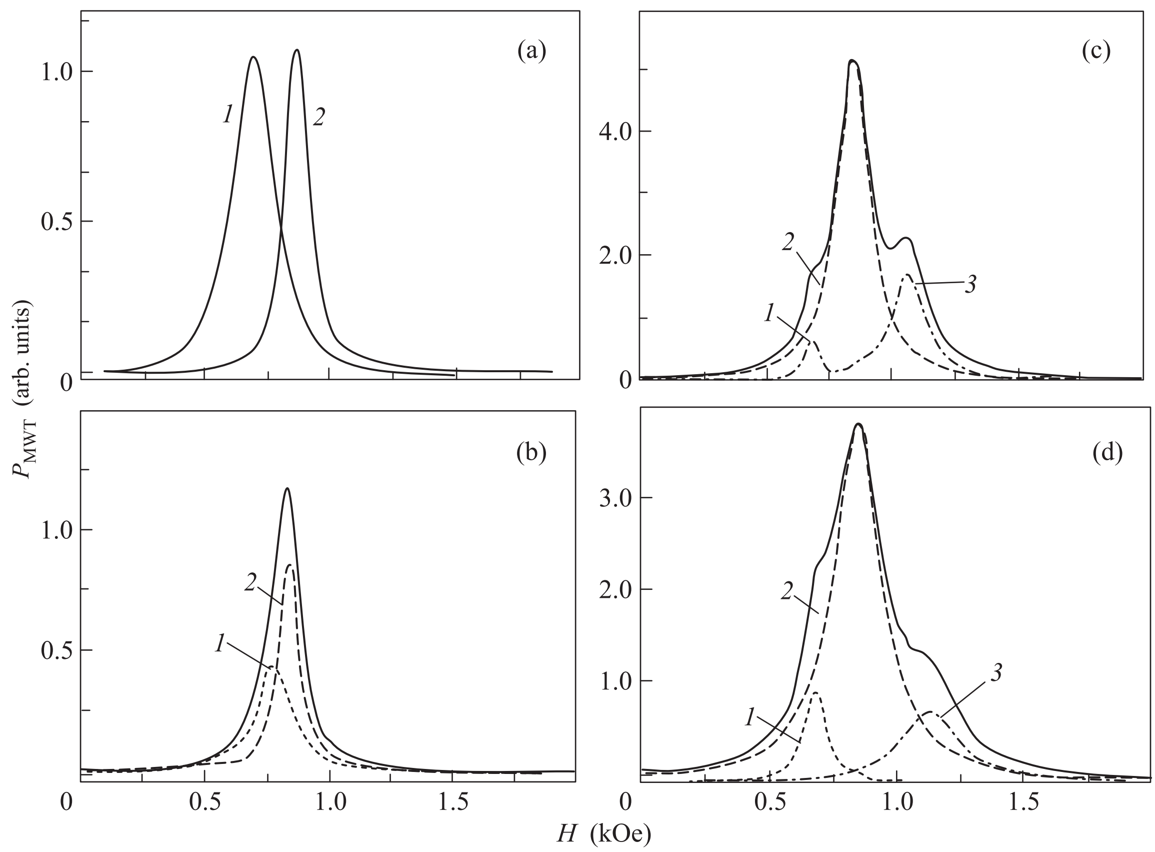

Рис. 1. Спектр СВЧ поглощения в пленках $[(\mathrm{CoP})_{\mathrm{soft}}/\mathrm{NiP}/(\mathrm{CoP})_{\mathrm{hard}}/\mathrm{NiP}]_n$. (a) – *1* – $\mathrm{CoP_{soft}}$, *2* – $(\mathrm{CoP})_{\mathrm{soft}}/\mathrm{NiP}$, (b) – $n = 1$, (c) – $n = 5$, (d) – $n = 10$

гослойные структуры с количеством блоков $n = 1$, 5, 10. Оба магнитных слоя имели толщину $t = 5$ нм и немагнитный слой $t_{\mathrm{NiP}} = 2$ нм. В качестве метода исследования был выбран ферромагнитный резонанс (ФМР), как метод чувствительный к изменениям внутренних полей различной природы. Спектры электронного магнитного резонанса измерялись на спектрометре “Bruker E 500 CW EPR”, действующем на частоте $\omega_{\mathrm{MWF}} = 9.4$ ГГц. В эксперименте постоянное магнитное поле лежало в плоскости пленки. Обработка спектров осуществлялась путем подгонки экспериментальной интегральной кривой поглощения на составляющие лоренцевского типа.

В литературе имеются сообщения [12] о наблюдении ФМР в двухслойной магнитной пружине Sm–Co/Fe. Авторы наблюдали три пика поглощения, где один пик они приписывают объемной моде, а два других поверхностным модам слоя железа.

Из магнитостатических данных [10] следует, что поле насыщения намагниченности для всех исследованных пленок удовлетворяет условию Hs ≤ 500 Э. Как видно из приведенных ниже рисунков, в условиях магнитного резонанса все пленки находятся в насыщенном состоянии. На рис. 1a приведены кривые СВЧ-поглощения (P_{MWF}) для одиночного слоя $\mathrm{CoP_{soft}}$ (кривая *1*) и для двухслойной пленки $(\mathrm{CoP})_{\mathrm{soft}}/\mathrm{NiP}$ (кривая *2*). Видно, что нанесение немагнитного слоя NiP приводит к смещению резонансной кривой в область бóльших магнитных полей. В случае анизотропной магнитной пленки резонансная частота дается выражением [13]:

$$(\omega/\gamma)^2 = H(H + H_A + H_M), \tag{1}$$

где

$$H_M = 4\pi M, \quad H_A = 2K/(t_{\mathrm{FM}}M), \tag{2}$$

все обозначения в формулах традиционные.

Используя значение намагниченности для одиночного магнитомягкого слоя из работы [10] $M \approx \approx 1400$ Гс, что примерно совпадает со значением намагниченности для кубической фазы при толщине кобальтового слоя $t_{\mathrm{Co}} \approx 5$ нм [14], при условии $H_A = 0$, мы получаем неплохое соответствие экспериментального значения резонансного поля (рис. 2a, кривая *1*) и рассчитанного по формуле (1) ($H_r = = 664$ Э при $T = 120$ К). Как следует из (1), влияние слоя аморфного никеля может быть связано ли-

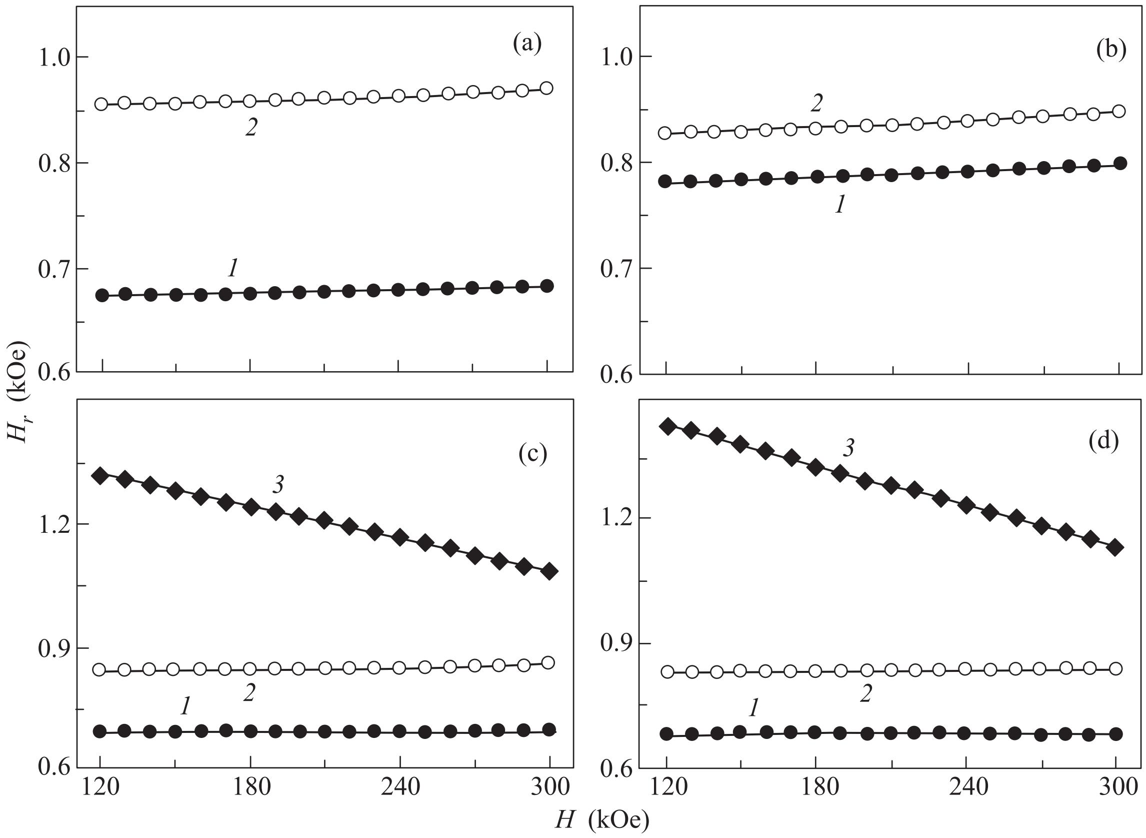

Рис. 2. Температурные зависимости резонансных полей пленок $[(\mathrm{CoP})_{\mathrm{soft}}/\mathrm{NiP}/(\mathrm{CoP})_{\mathrm{hard}}/\mathrm{NiP}]_n$. (a) – *1* – $\mathrm{CoP}_{\mathrm{soft}}$, *2* – $(\mathrm{CoP})_{\mathrm{soft}}/\mathrm{NiP}$, (b) – $n = 1$, (c) – $n = 5$, (d) – $n = 10$

бо с уменьшением намагниченности за счет возникновении “мертвого слоя” на интерфейсе магнитный-немагнитный слой, либо с появлением перпендикулярной анизотропии. В последнем случае оценка по формуле (1) при тех же значениях намагниченности дает величину поля интерфейсной анизотропии $H_A = -4350$ Э. Как известно [15], на границе никеля с германием происходит изменение магнитной анизотропии, которое проявляется тем сильнее, чем меньше толщина никеля, а в структуре Co/Ni при малых толщинах слоев [16] возникает перпендикулярная анизотропия.

Исследование изолированного немагнитного слоя NiP показало отсутствие СВЧ-сигнала.

В трехслойной пленочной структуре с $n = 1$ спектр состоит из двух линий СВЧ-поглощения (см. рис. 1b), но обе линии находятся в интервале магнитных полей между значениями, соответствующими резонансным полям магнитомягкого слоя ($\mathrm{CoP}_{\mathrm{soft}}$) и бислойной пленки ($\mathrm{CoP}_{\mathrm{soft}}/\mathrm{NiP}$). А это означает, что моды магнитных колебаний взаимосвязаны. При увеличении количества блоков (n) возникает третий пик СВЧ-поглощения. Структура спектра такова, что низкополевые линии (линии *1* и *2*) имеют близкие значения резонансного поля и находятся в диапазоне резонансных полей, присущих пленке с $n = 1$ (см. рис. 1). Установлено, что с увеличением количества блоков происходит изменение формы резонансного спектра с заметным изменением величины резонансного поля высокополевого пика (линия *3*) в зависимости от числа блоков (n).

Получены температурные зависимости резонансного поля (H_{r}) для всех пленок (рис. 2). Для пленок с $n = 5$ и 10 величины резонансных полей низкополевых пиков растут при увеличении температуры, а H_{r} высокополевого пика уменьшается при тех же условиях. (Нумерация кривых на рис. 2 и рис. 3 соответствует пикам поглощения на рис. 1.)

В случае пленочных структур с бо́льшим числом блоков появление третьего пика поглощения не укладывается в простую схему двухподрешеточной модели. Естественно возникает вопрос, а какая подсистема разбивается на две?

Из рис. 1 (части b–d) видно, что для всех многослойных пленок в спектре СВЧ-поглощения пик 2, обладающий наибольшей интенсивностью, находит-

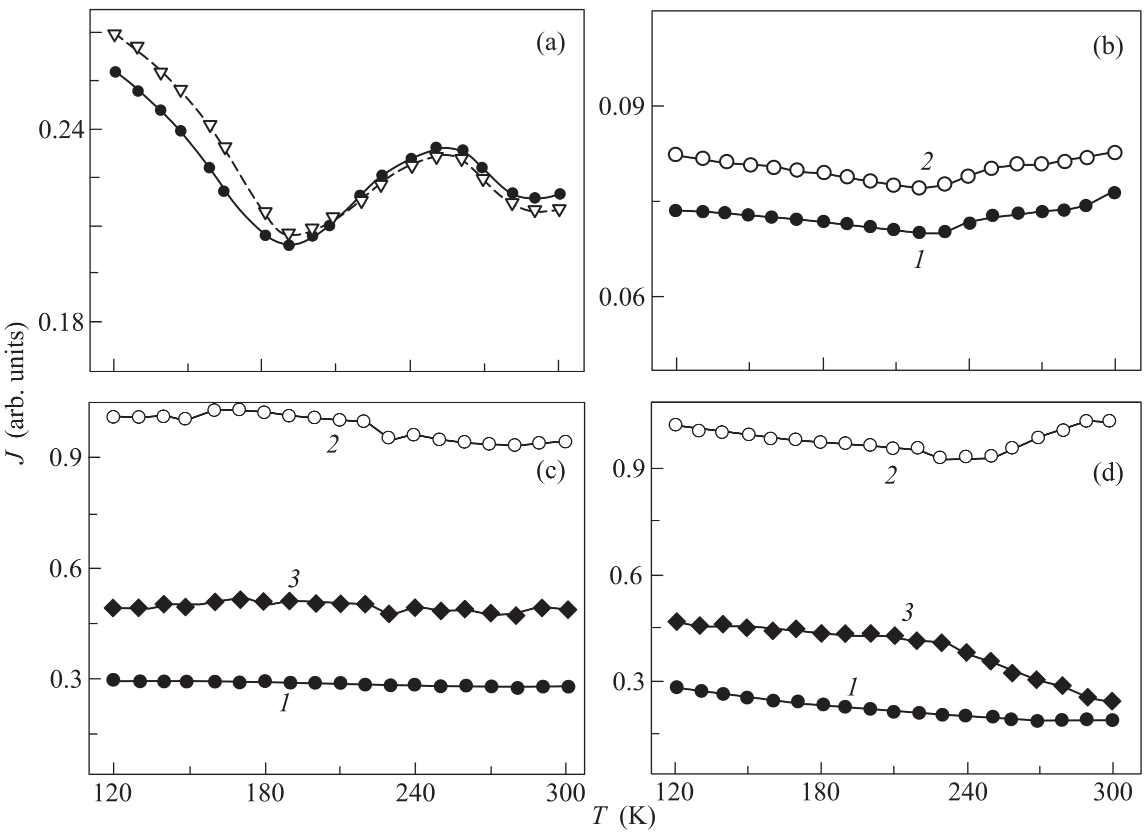

Рис. 3. Температурные зависимости интенсивностей линий резонансного поглощения пленок $[(\mathrm{CoP})_{\mathrm{soft}}/\mathrm{NiP}/(\mathrm{CoP})_{\mathrm{hard}}/\mathrm{NiP}]_n$. (a) – *1* – $\mathrm{CoP}_{\mathrm{soft}}$, *2* – $(\mathrm{CoP})_{\mathrm{soft}}/\mathrm{NiP}$, (b) – $n = 1$, (c) – $n = 5$, (d) – $n = 10$

ся примерно в области полей, соответствующих величине резонансного поля для пленки ($\mathrm{CoP}_{\mathrm{soft}}/\mathrm{NiP}$) (сравни с рис. 2). Это дает основание полагать, что в многослойных структурах этот пик относится к резонансному поглощению в подсистеме, образованной магнитомягкими слоями.

Из рассмотрения петель намагничивания [10], было установлено, что при увеличении n относительный вклад в полную намагниченность от подсистемы магнитожестких слоев по сравнению с вкладом магнитомягкой подсистемы уменьшается. Такое поведение связывается с сильным влиянием магнитомягкого слоя на процесс намагничивания магнитожесткого слоя. При этом особенности намагничивания можно объяснить при условии существования дальнодействующего межслоевого взаимодействия, т.е. более дальнего, чем взаимодействие между ближайшими соседними слоями. Учет отрицательного биквадратичного межслоевого взаимодействия может быть причиной скошенной структуры, но система все равно остается двухподрешеточной. Образование неколлинеарной структуры наблюдалось ранее [17] в многослойных пленках $[\mathrm{Gd/Si/Co}]_n$, где имеет место поведение, подобное спин-стекольному, при отрицательном обменном взаимодействии между суммарными магнитными моментами редкоземельных и кобальтовых слоев. При этом редкоземельная подсистема образовывала конусную структуру. Неколлинеарное магнитное состояние изучалось также в многослойных пленках $[\mathrm{Fe/Cr}]_n$ [18], однако в этих структурах неколлинеарность определяется волной спиновой плотности в хроме, зависит от толщины его слоя, а не от количества блоков в структуре.

Если одна подсистема разбивается на две, то в этом случае может реализоваться ситуация подобная упорядочению Яфета–Киттеля [19] для ферритов, когда образуется скошенная магнитная структура, т.е. необходимо наличие антиферромагнитного взаимодействия между слоями, следующими за ближайшим магнитным слоем. Это приводит к выводу, что между магнитомягким и магнитожестким слоями существует ферромагнитное взаимодействие, а между ближайшими слоями одной из подсистем реализуется антиферромагнитное взаимодействие. С учетом того [10], что при намагничивании многослойной структуры влияние магнитомягкой подсистемы усиливается при увеличении n, то, по-видимому, на две скошенные подрешетки разбивается подсистема магнитожестких слоев. Косвенно в пользу этого свидетельствует поведение интенсивностей (J) линий поглощения на рис. 3 (определяемых как площади под соответствующими кривыми на рис. 1). Видно (рис. 3a), что нанесение немагнитного слоя никеля практически не изменяет интенсивность поглощения одиночного слоя кобальта и ее температурное поведение. Для пленки с $n = 1$ интенсивности линий сравнимы по величине (рис. 3b). В случае пленок с $n = 5$ отношение интенсивностей $J_3/J_1 \approx 3/2$, а для $n = 10$ это отношение стремится к 1. Наблюдаемое различие интенсивностей может быть связано с различием условий возбуждения этих мод. Такие соотношения интенсивностей согласуются с отношением количества слоев в каждой из скошенных подсистем.

Таким образом, в многослойной магнитной пружине впервые пронаблюдали магнитный резонанс и установили, что межслоевое взаимодействие зависит от числа слоев в структуре. Вопрос о механизмах, приводящих к дальнодействующим взаимодействиям в многослойной структуре, пока остается открытым, и это является задачей ближайших исследований. Также пока непонятна причина небольшой аномалии в температурной зависимости интенсивности в районе $T \approx 220$ K, тогда как в зависимости резонансных полей этого не проявляется.

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

1. I. Zutič, J. Fabian, and S. Das Sarma, Rev. Mod. Phys. **76**, 323 (2004).
2. J. Nogues, J. Sort, V. Langlais, V. Skumraev, S. Surinach, J. S. Minoz, and M. D. Baró, Phys. Rep. **422**, 65 (2005).
3. S. D. Bader, Rev. Mod. Phys. **78**, 1 (2006).
4. S. Zawatzki, R. Heller, Ch. Mickel, M. Seifert, and L. Schultz, V. Neu. J. Appl. Phys. **109**, 123922 (2011).
5. F. Radu, R. Abrudan, I. Radu, D. Schmitz, and H. Zabel, Nature Commun. **3**, 1728 (2012).
6. B. Altuncevahar and A. R. Koymen, J. Appl. Phys. **89**, 6822 (2001).
7. 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).
8. E. E. Fullerton, J. S. Jiang, C. H. Sowers, J. E. Pearson, and S. D. Bader, Appl. Phys. Lett. **72**, 380 (1998).
9. J. Zhang, Y. K. Takahashi, R. Gopalan, and K. Hono, Appl. Phys. Lett. **86**, 122509 (2005).
10. G. S. Patrin, Ya. Shiyan, K. G. Patrin, and G. Yu. Yurkin, J. Low Temp. Phys. **182**, 73 (2016).
11. J. Colaruotolo and D. Tramontana, *Engineering applications of electroless nickel*, in *Electroless Plating Tundamentals and Applications*, V. 8, ed. by G. O. Mallory and J. B. Hajdu, Publications/William Abdrew Publishing, LLC, N.Y. (1990). Table 8.1, p. 208.
12. F. Yıldız, O. Yalcın, M. Özdemir, B. Aktas, Y. Köseoğlu, and J. S. Jiang, JMMM **272–276**, e1941 (2004).
13. А. Г. Гуревич, *Магнитный резонанс в ферритах и антиферромагнетиках*, Наука, М. (1973), с. 54.
14. Г. С. Патрин, А. В. Кобяков, И. А. Турпанов, К. Г. Патрин, М. Рауцкий, ФТТ **58**, 1000 (2016).
15. И. С. Эдельман, Г. С. Патрин, Д. А. Великанов, А. В. Черниченко, И. А. Турпанов, Г. В. Бондаренко, Письма в ЖЭТФ **87**, 311 (2008).
16. F. J. A. den Breeder, E. Janssen, A. Mud, and J. M. Kerkhof, JMMM **126**, 563 (1993).
17. G. S. Patrin, V. O. Vas'kovskii, D. A. Velikanov, A. V. Svalov, and M. A. Panova, Phys. Lett. A **399**, 155 (2003).
18. А. Б. Дровосеков, Н. М. Крейнес, Д. И. Холин, В. Ф. Мещеряков, М. А. Миляев, Л. Н. Ромашов, В. В. Устинов, Письма ЖЭТФ **67**, 690 (1998).
19. С. Крупичка, *Физика ферритов и родственных им магнитных окислов*, Мир, М. (1976), Т. 1, с. 266.