

05,12

Влияние магнитомягкой фазы на процессы перемагничивания магнитотвердого/магнитомягкого бислоя

© Т.А. Тааев, К.Ш. Хизриев, А.К. Муртазаев

Институт физики им. Х.И. Амирханова ДФИЦ РАН,
Махачкала, Россия

E-mail: taaev89@mail.ru

Поступила в Редакцию 30 декабря 2019 г.

В окончательной редакции 30 декабря 2019 г.

Принята к публикации 10 января 2020 г.

Проведено исследование процессов перемагничивания магнитотвердого/магнитомягкого бислоя во внешнем магнитном поле с помощью метода Монте-Карло. Построены кривые перемагничивания магнитного бислоя при различных значениях толщины магнитомягкого слоя. Также изучено влияние величины внутрислойного обменного взаимодействия и константы анизотропии магнитомягкого слоя на процессы перемагничивания. Приведены фазовые диаграммы магнитного бислоя.

Ключевые слова: магнетизм, спиновая пружина, магнитотвердая/магнитомягкая гетероструктура, метод Монте-Карло.

DOI: 10.21883/FTT.2020.06.49335.29M

1. Введение

С точки зрения современной реальности развития электронных нанотехнологий чрезвычайно интересными объектами являются обменно-связанные магнитные гетероструктуры, состоящие из чередующихся магнитотвердых и магнитомягких атомных слоев [1–22]. Стремительный рост интереса к этим искусственным магнитным материалам связан не только с широкими перспективами их практического применения, но и с тем, что они обладают рядом уникальных особенностей. Например, они открывают возможности для увеличения максимального энергетического произведения $(BH)_{\max}$, а также в них возможно формирование во внешнем магнитном поле гетерофазной одномерной спиновой пружины. Совсем недавно были получены магнитные гетероструктуры, в которых образуются устойчивые спиновые пружины [23]. Поэтому технологическая значимость этих материалов приобретает новый уровень: использование в качестве быстродействующих аттенуаторов, магнитных датчиков, продвинутых носителей информации с большой плотностью записи и т. д.

Основной характеристикой магнитотвердых материалов является максимальное значение энергетического произведения $(BH)_{\max}$. Показатель $(BH)_{\max}$ определяется высокими значениями намагниченности насыщения материала, магнитной анизотропии и температуры Кюри. Большими значениями намагниченности насыщения обладают магнитомягкие материалы, такие как железо, кобальт. А редкоземельные материалы (Re) обладают сильной анизотропией и имеют большую магнитную жесткость. Магнитный бислой, состоящий из магнитомягкого (Fe, Co и др.) и магнитотвердого слоя (Re), будет иметь большие значения энергетического произведения $(BH)_{\max}$. В настоящей работе мы исследуем влия-

ние толщины, значений обменного внутрислойного взаимодействия и константы анизотропии магнитомягкого слоя на процессы перемагничивания модели магнитного бислоя методом Монте-Карло.

2. Модель и методика исследования

Исследование SmCo/Fe бислоя методом мессбауэровской спектроскопии, характеризующихся большим значением анизотропии типа „легкая ось“, показало упорядочение магнитных моментов в плоскости системы [13]. В связи с этим, для изучения системы магнитотвердого/магнитомягкого бислоя мы используем стандартную XY-модель [24–27].

Гамильтониан системы имеет вид:

$$H = -\frac{1}{2} \sum_{i,j} J(S_i^x S_j^x + S_i^y S_j^y) - \sum_i K(S_i^x)^2 - g\mu \sum_i (H_0^x S_i^x + H_0^y S_i^y), \quad (1)$$

где первая сумма учитывает обменное взаимодействие каждого магнитного атома с ближайшими соседями внутри слоев с обменов $J = J_{\text{hard}}$ и $J = J_{\text{soft}}$ в магнитотвердом и магнитомягком слоях соответственно, и межслойное взаимодействие с параметром $J = J_{\text{int}}$; вторая сумма учитывает вклад анизотропии в энергию системы, $K = K_{\text{hard}}$ и $K = K_{\text{soft}}$ — соответственно константы анизотропии магнитотвердого и магнитомягкого слоев; третья сумма — вклад внешнего магнитного поля в энергию системы, $g \approx 2$ — фактор Ланде, μ — магнетон Бора, $H_0^{x,y}$ — проекции вектора внешнего магнитного поля \mathbf{H}_0 , $S_i^{x,y}$ — проекции спина \mathbf{S}_i , локализованного на узле i , $|\mathbf{S}_i| = 1$.

Расчеты проводились стандартным алгоритмом Метрополиса метода Монте-Карло [28] для систем с линейными размерами $L_x \times L_y \times L_z$, при температуре T намного ниже T_c для модели магнитного бислоя [25]. По осям x и y линейные размеры системы были фиксированы ($L_x = L_y = 50$), а по оси z принимали различные значения, в зависимости от толщины магнитомягкого слоя. Толщина магнитотвердого слоя была фиксирована ($t_{\text{hard}} = 50$), а магнитомягкого слоя варьировала от 10 до 50 атомных слоев.

В ходе численного эксперимента нами были использованы следующие значения параметров: $J_{\text{soft}} = 2.8 \cdot 10^{-6}$ ergs/cm, $J_{\text{hard}} = 1.2 \cdot 10^{-6}$ ergs/cm, $J_{\text{int}} = 1.8 \cdot 10^{-6}$ ergs/cm, $K_{\text{hard}} \times d^2 / J_{\text{soft}} = 7.14 \cdot 10^{-3}$, $K_{\text{soft}} = 0$, $d = 2 \text{ \AA}$ — расстояние между атомными слоями, $|S_i| = 1$ [2,25]. В гамильтониане (1) значения обменных констант и констант анизотропии были нормированы к J_{soft} . Угол между направлениями векторов внешнего магнитного поля и анизотропии магнитотвердого слоя равен 177° .

В процессе численного эксперимента наблюдали за следующими параметрами: намагниченностью всей системы M , ее продольными M_{long} и поперечными M_{tran} компонентами, а также за намагниченностями каждого магнитного монослоя M_j :

$$M = \left\langle \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_i \right\rangle, \quad (2)$$

$$M_{\text{long}} = M \cos \alpha, \quad (3)$$

$$M_{\text{tran}} = M \sin \alpha, \quad (4)$$

$$M_j = \left\langle \frac{1}{L_x \times L_y} \sum_{i=1}^{L_x \times L_y} S_i \right\rangle_j, \quad (5)$$

где N — число атомов, α — угол между направлениями векторов намагниченности M и анизотропии магнитотвердого слоя типа „легкая ось“. Угловые скобки означают усреднение по ансамблю.

3. Результаты исследования

На рис. 1 показаны полевые зависимости общей намагниченности M при различной толщине t_{soft} магнитомягкого слоя. Как видно на рис. 1 с увеличением толщины магнитомягкого слоя, характеристические значения H_{ex} (поле обменного смещения, при котором магнитные моменты атомов магнитомягкого слоя начинают вращаться, как в стенке Блоха) и H_{irr} (критическое поле) внешнего магнитного поля уменьшаются. Это связано с тем, что в модели магнитного бислоя анизотропия магнитомягкого слоя равна нулю и магнитные моменты в этом слое свободно вращаются под действием внешнего магнитного поля. Магнитомягкий слой ухудшает магнитоупругие свойства магнитного бислоя.

На рис. 2 приведена фазовая диаграмма зависимости значений H_{ex} и H_{irr} от толщины магнитомягкого слоя.

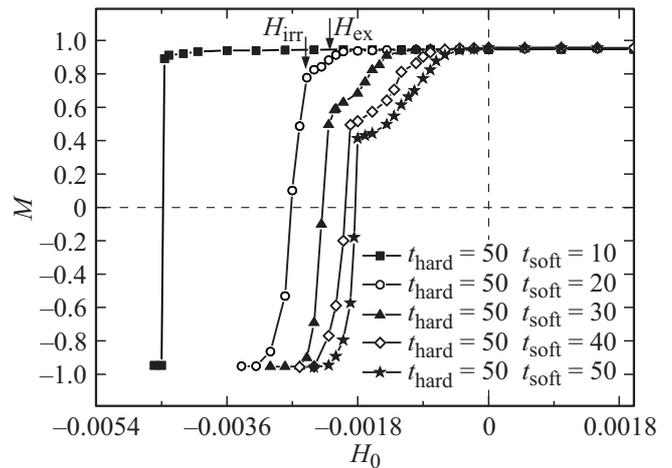


Рис. 1. Кривые перемагничивания общей намагниченности M при различной толщине магнитомягкого слоя t_{soft} .

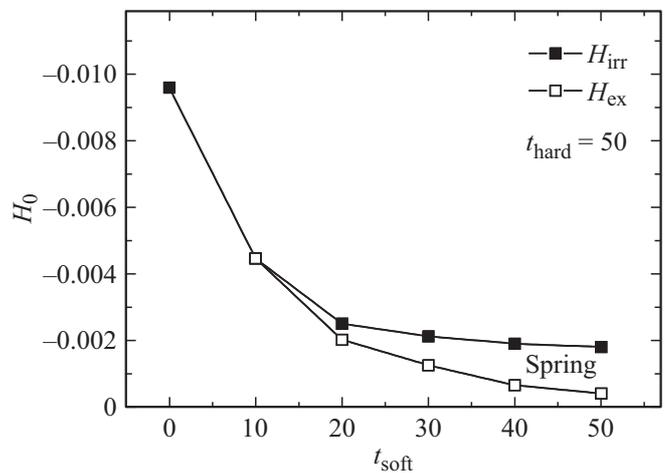


Рис. 2. Фазовая диаграмма зависимости значений H_{ex} и H_{irr} внешнего магнитного поля от толщины магнитомягкого слоя t_{soft} .

„Spring“ — область между кривыми H_{ex} и H_{irr} , где в магнитном бислое образуется спиновая пружина при включении внешнего магнитного поля. С уменьшением толщины магнитомягкого слоя t_{soft} величины H_{ex} и H_{irr} стремятся к одному значению, область „spring“ уменьшается, а при толщине магнитомягкого слоя в 10 атомных слоев и вовсе исчезает. Причиной этому является то, что при толщине $t_{\text{soft}} \leq 10$ магнитные моменты атомов магнитомягкого слоя жестко связаны с магнитными моментами атомов магнитотвердого слоя и практически не вращаются. В связи с чем, спиновая пружина в модели магнитного бислоя не образуется.

Также на рис. 2 приведено значение критического магнитного поля H_{irr} для магнитотвердого слоя. Как видно из рисунка при добавлении магнитомягкого слоя толщиной всего лишь 10 атомных слоев, значение H_{irr} уменьшается практически вдвое. Зависимость критического значения внешнего магнитного поля H_{irr}

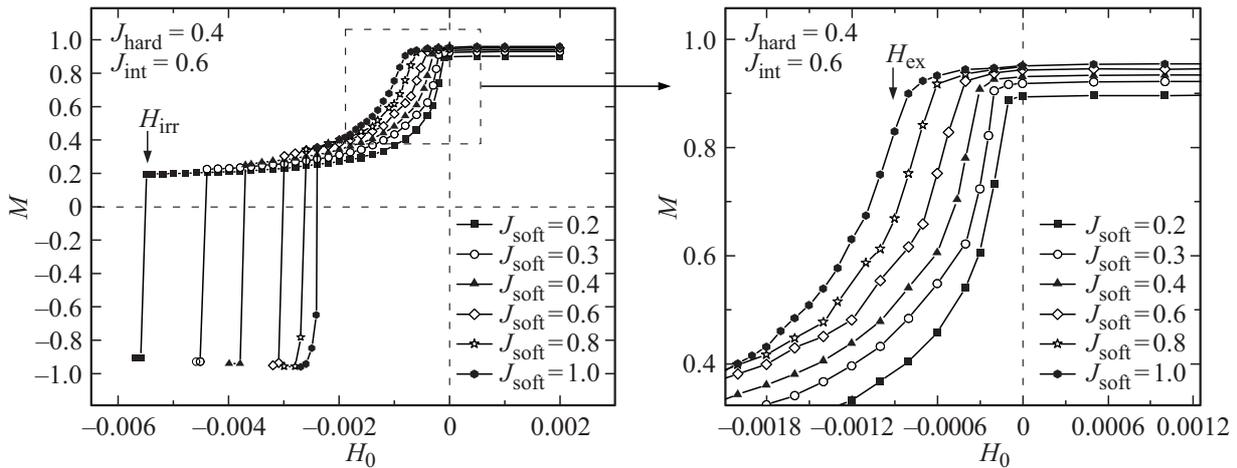


Рис. 3. Кривые перемангничивания общей намагниченности M при различных значениях константы обменного параметра J_{soft} .

от толщины магнитомягкого слоя хорошо согласуется с результатами работ Фуллертон и его коллег [2].

Из работы [4] известно, что во внешнем магнитном поле намагниченность магнитомягкого слоя остается сонаправленной и параллельной намагниченности магнитотвердого слоя вплоть до значений внешнего поля

$$H_{\text{ex}} = \pi^2 J_{\text{soft}} / 2M_s t_{\text{soft}}^2, \quad (6)$$

где J_{soft} — обменная константа взаимодействия между спинами внутри магнитомягкого слоя, t_{soft} — толщина магнитомягкого слоя, M_s — намагниченность насыщения магнитомягкого слоя.

Как следует из формулы (6) значение поля обменного смещения H_{ex} имеет обратную квадратичную зависимость от толщины магнитомягкого слоя ($H_{\text{ex}} \propto 1/t_{\text{soft}}^2$). На рис. 2 видно, что наши результаты качественно хорошо согласуется с теоретическими предсказаниями при толщине магнитомягкого слоя $t_{\text{soft}} > 20$ атомных слоев.

На рис. 3 показаны кривые перемангничивания магнитной модели при различных значениях константы обменного взаимодействия магнитомягкого слоя J_{soft} . Значения обменных констант магнитотвердого слоя и межслойного взаимодействия принимали значения $J_{\text{hard}} = 0.4$ и $J_{\text{int}} = 0.6$. Толщина магнитотвердого и магнитомягкого слоев были фиксированы ($t_{\text{soft}} = t_{\text{hard}} = 50$ атомных монослоев). Как видно на рис. 3, при увеличении константы обменного взаимодействия магнитомягкого слоя J_{soft} , критическое значение H_{irr} внешнего магнитного поля уменьшается, а значение H_{ex} — растет. Увеличение константы J_{soft} приводит к тому, что магнитные моменты атомов более жестко связаны между собой и, соответственно, требуется приложить большую величину магнитного поля, чтобы заставить их вращаться. Поле обменного смещения H_{ex} увеличивается, и петля становится более выпуклой. Увеличение внутрислойного обмена приводит к тому, что в результате поворота магнитные моменты магнитомягкого слоя увлекают за

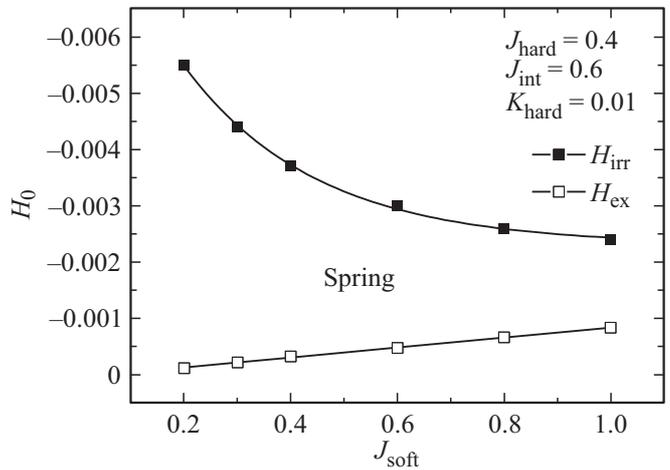


Рис. 4. Фазовая диаграмма зависимости характеристических значений магнитных полей H_{irr} и H_{ex} от константы обменного взаимодействия магнитомягкого слоя J_{soft} .

собой спины всё большего количества соседних монослоев и намагниченность магнитомягкого слоя быстро достигает насыщения.

Зависимость величин H_{irr} и H_{ex} от значения обменного параметра магнитомягкого слоя приведена на рис. 4. Из формулы (6) также видно, что характеристическое значение поля H_{ex} зависит линейно от обменного взаимодействия магнитомягкого слоя J_{soft} ($H_{\text{ex}} \propto J_{\text{soft}}$). В рамках погрешности, значения H_{ex} практически ложатся на прямую, что свидетельствует о хорошем согласии наших данных с формулой (6). Более детальное исследование влияния обменных параметров внутрислойного и межслойного взаимодействия модели магнитотвердого/магнитомягкого бислоя было выполнено в работе [24].

Полевые зависимости общей намагниченности M при различных значениях константы анизотропии K_{soft} магнитомягкого слоя показаны на рис. 5. Значения остальных параметров обменного взаимодействия дан-

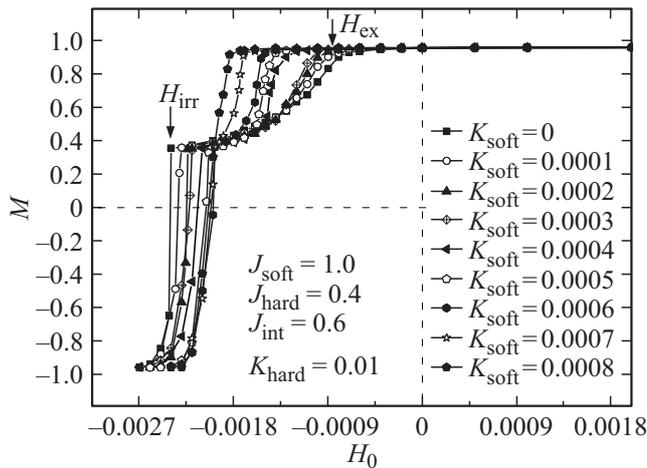


Рис. 5. Кривые перемагничивания общей намагниченности M при различных значениях константы анизотропии магнитомягкого слоя K_{soft} .

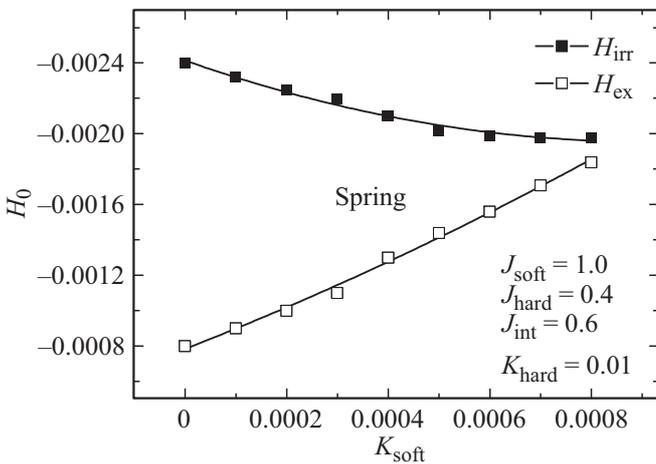


Рис. 6. Фазовая диаграмма зависимости характеристических значений магнитных полей H_{irr} и H_{ex} от константы магнитомягкого слоя K_{soft} .

ной модели магнитного бислоя были фиксированы. Как видно из рисунка, увеличение константы анизотропии магнитомягкого слоя влечет за собой увеличение поля обменного смещения H_{ex} и уменьшение критического поля H_{irr} . Появление анизотропии типа „легкая ось“ в магнитомягком слое приводит к тому, что магнитные моменты атомов принимают только два положения: против и вдоль приложенного внешнего магнитного поля. В связи с чем, магнитные моменты атомов не будут свободно вращаться под действием внешнего магнитного поля. Это вызывает увеличение поля обменного смещения H_{ex} и уменьшение критического поля H_{irr} .

На рис. 6. приведена зависимость характеристических значений H_{ex} и H_{irr} от константы анизотропии K_{soft} магнитомягкого слоя. Область „spring“ на фазовой диаграмме (рис. 6) с ростом K_{soft} уменьшается, а при значении $K_{\text{soft}} = 0.0008$ практически исчезает. Поведение магнитомягкого слоя во внешнем магнитном поле становится

похожим на поведение магнитотвердого слоя. Критическое значение константы анизотропии магнитомягкого слоя ($K_{\text{soft}} = 0.0008$), при котором невозможно образование спиновой пружины, на порядок меньше константы анизотропии K_{hard} магнитотвердого слоя.

4. Заключение

В работе показано, что изменением некоторых параметров магнитомягкого слоя можно добиться получения магнитотвердого/магнитомягкого бислоя с необходимыми, наперед заданными и уникальными магнитными характеристиками. В частности, было изучено влияние трех параметров магнитомягкого слоя на магнитные свойства бислоя: значения толщины магнитомягкого слоя, величины константы обменного взаимодействия и константы анизотропии магнитомягкого слоя. Увеличение толщины магнитомягкого слоя при фиксированной толщине магнитотвердого слоя приводит к уменьшению характеристических значений H_{ex} и H_{irr} внешнего магнитного поля и магнитоупругие свойства ухудшаются. Зависимость значения H_{ex} от толщины магнитомягкого слоя хорошо согласуется с теоретическими выкладками при толщине магнитомягкого слоя больше 20 атомных слоев. Показано, что поле обменного смещения H_{ex} зависит линейно от J_{soft} , что хорошо согласуется с теоретическими данными. Появление анизотропии в магнитомягком слое улучшает магнитоупругие свойства магнитного бислоя. Но при значении $K_{\text{soft}} \geq 0.0008$, магнитомягкий слой становится по своим магнитоупругим свойствам похожим на магнитотвердый и образование спиновой пружины в модели магнитотвердого/магнитомягкого бислоя невозможно. Опираясь на результаты исследования, можно будет определить оптимальный состав для производства подходящих магнитотвердых/магнитомягких гетероструктур.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18-32-00526 „мол_а“).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] E.F. Kneller, R. Hawig. IEEE Trans. Magn. **27**, 3588 (1991).
- [2] E.E. Fullerton, J.S. Jiang, M. Grimsditch, C.H. Sowers, S.D. Bader. Phys. Rev. B **58**, 12193 (1998).
- [3] R. Skomski, J.M.D. Coey. Phys. Rev. B **48**, 15812 (1993).
- [4] E. Goto, N. Hayashi, T. Miyashita, K. Nakagawa. J. Appl. Phys. **36**, 2951 (1965).
- [5] K. Mibu, T. Nagahama, T. Shinjo. JMMM **163**, 75 (1996).

- [6] R. Coehoorn, D.B. de Mooij, C. De Waard. *JMMM* **80**, 101 (1989).
- [7] M. Amato, M.G. Pini, A. Rettori. *Phys. Rev. B* **60**, 3414 (1999).
- [8] R. Andreescu, M.J. O'Shea. *J. Appl. Phys.* **91**, 8183 (2002).
- [9] Shi-Shen Yan, M. Elkawni, D.S. Li, H. Garmestani, J.P. Liu, J.L. Weston, G. Zangari. *J. Appl. Phys.* **94**, 4535 (2003).
- [10] Guang-hua Guo, Guang-fu Zhang, San-yuan Song, D.W. Wang, G.J. Bowden, P.A.J. de Groot. *Appl. Phys. Lett.* **93**, 102505 (2008).
- [11] F. Montaigne, S. Mangin, Y. Henry. *Phys. Rev. B* **67**, 144412 (2003).
- [12] J. McCord, Y. Henry, T. Hauet, F. Montaigne, E.E. Fullerton, S. Mangin. *Phys. Rev. B* **78**, 094417 (2008).
- [13] V.M. Uzdin, A. Vega, A. Khrenov, W. Keune, V.E. Kuncser, J.S. Jiang, S.D. Bader. *Phys. Rev. B* **85**, 024409 (2012).
- [14] Cai-yin You, ChoongJin Yang, Z.D. Zhang, JongSoo Han, X.K. Sun. *J. Mater. Res.* **19**, 786 (2004).
- [15] V.M. Uzdin, A. Vega. *Nanotechnology* **19**, 315401 (2008).
- [16] A.V. Khvalkovskii, K.A. Zvezdin, A.A. Zvezdin, V.S. Gornakov, D.G. Skachkov, P. Perlo. *Physica B* **372**, 358 (2006).
- [17] N. de Sousa, A. Apolinario, F. Vernay, P.M.S. Monteiro, F. Albertini, F. Casoli, H. Kachachi, D.S. Schmool. *Phys. Rev. B* **82**, 104433 (2010).
- [18] P. Chowdhury, M. Krishnan, Harish C. Barshilia, D.V. SridharaRao, Deepak Kumar, C. Shivakumara. *JMMM* **342**, 74 (2013).
- [19] S. Djedai, E. Talbot, P.E. Berche. *JMMM* **368**, 29 (2014).
- [20] Rajan Goyal, Nishta Arora, Akanksha Kapoor, S. Lamba, S. Annapoorni. *J. Alloys Comp.* **695**, 1014 (2017).
- [21] Г.С. Патрин, И.А. Турпанов, В.И. Юшков, А.В. Кобяков, К.Г. Патрин, Г.Ю. Юркин, Я.А. Живая. *Письма в ЖЭТФ* **109**, 324 (2019).
- [22] A.V. Kobayakov, I.A. Turpanov, G.S. Patrin, V.I. Yushkov, S.A. Yarikov, M.N. Volochaev, Ya.A. Zhivaya. *J. Phys. Conf. Ser.* **1389**, 012028 (2019).
- [23] L.V. Dzemiantsova, G. Meier, R. Röhlberger. *Sci. Rep.* **5**, 16153 (2015).
- [24] T.A. Тааев, К.Ш. Хизриев, А.К. Муртазаев. *ЖЭТФ* **156**, 331 (2019).
- [25] T.A. Тааев, К.Ш. Khizriev, A.K. Murtazaev, V.M. Uzdin. *J. Alloys Comp.* **678**, 167 (2016).
- [26] T.A. Тааев, К.Ш. Хизриев, А.К. Муртазаев. *ЖЭТФ* **151**, 1084 (2017).
- [27] T.A. Тааев, К.Ш. Khizriev, A.K. Murtazaev. *J. Alloys Comp.* **785**, 1253 (2019).
- [28] N. Metropolis, A.W. Rosenbluth, M.N. Rosenbluth, A.H. Teller, E. Teller. *J. Chem. Phys.* **21**, 1087 (1953).

Редактор Т.Н. Василевская