

11;12

Ферромагнитный резонанс в эпитаксиальных пленках $(\text{Bi,Lu})_3(\text{Fe,Ga})_5\text{O}_{12}$ с ориентацией (210)

© В.В. Рандошкин, Н.Н. Усманов, Ю.А. Кокшаров, В.И. Козлов,
А.М. Салецкий, Н.Н. Сысоев, Н.В. Васильева

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
119992 Москва, Россия
e-mail: randoskin_v_v@hotmail.ru

(Поступило в Редакцию 7 июня 2005 г. В окончательной редакции 9 ноября 2005 г.)

Исследован ферромагнитный резонанс в эпитаксиальных пленках $(\text{Bi,Lu})_3(\text{Fe,Ga})_5\text{O}_{12}$, выращенных на подложках $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ с ориентацией (210). Спектр содержит ряд пиков, наиболее интенсивные из которых связаны с основным объемом пленки и переходным поверхностным слоем пленка–подложка. Основной объем пленки обладает пониженной магнитной анизотропией. Азимутальная и полярные зависимости резонансного поля обладают 180° симметрией.

PACS: 76.50.+g

Висмутсодержащие монокристаллические пленки ферритов-гранатов (Вс-МПФГ), выращиваемые методом жидкофазной эпитаксии из переохлажденного раствора-расплава, являются перспективными материалами для ряда магнитооптических приложений [1–6]. Вследствие нестационарности начальной и заключительной стадий эпитаксиального роста в этих пленках с необходимостью формируются переходные поверхностные слои пленка-подложка и пленка-воздух, отличающиеся по химическому составу и физическим параметрам от основного объема пленки [7–10]. В Вс-МПФГ с ориентацией (111) слой пленка-подложка обладает пониженной магнитной анизотропией, а слой пленка-воздух, наоборот, повышенной. В Вс-МПФГ с другими ориентациями, где магнитная анизотропия наводится за счет напряжений, природа слоев с различной анизотропией может быть иной.

О наличии переходных поверхностных слоев можно судить по спектру ферромагнитного резонанса (ФМР) [11–13]. Угловые зависимости резонансных полей при ФМР несут информацию о магнитной анизотропии пленок [11–20]. В частности, для Вс-МПФГ $(\text{Bi,Gd})_3(\text{Fe,Ga})_5\text{O}_{12}$ и $(\text{Bi,Ln,Gd})_3(\text{Fe,M})_5\text{O}_{12}$ ($\text{Ln} = \text{Lu}$ или La , $\text{M} = \text{Ga}$ или Al), выращенных на подложках $\text{Nd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ с ориентацией (100), азимутальная зависимость резонансного поля (параллельный резонанс) содержала четыре эквидистантных максимума примерно равной амплитуды [13,15]. Аналогичная зависимость для Вс-МПФГ, выращенных из того же раствора-расплава на подложках неодим-галлиевого граната (НГГ) с ориентацией (110), имела два эквидистантных максимума. В Вс-МПФГ, выращенных на подложках $\text{Ca}_3(\text{Nb,Ga})_5\text{O}_{12}$ с ориентацией (210), азимутальная зависимость резонансного поля имеет более сложный вид [16]. В пленках $(\text{Bi,Y,Lu,Pr})_3(\text{Fe,Ga})_5\text{O}_{12}$ с ориентацией (100) азимутальная зависимость резонансного поля содержала два эквидистантных максимума примерно равной амплитуды [17,18].

Целью настоящей работы являлось исследование ФМР в Вс-МПФГ $(\text{Bi,Lu})_3(\text{Fe,Ga})_5\text{O}_{12}$, выращенных на

подложках $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ с ориентацией (210). Пленки указанного состава, в отличие от исследованных в работах [17,18], не содержат быстрорелаксирующих ионов, поэтому линия ФМР достаточно узкая, а эффективное значение гиромагнитного отношения γ в пленках такое же, как у ионов Fe^{3+} ($1.76 \cdot 10^7 \text{ Oe}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$). Кроме того, ионы Lu^{3+} в паре с ионами Bi^{3+} индуцируют не слишком высокую одноосную магнитную анизотропию, поэтому линия ФМР при всех ориентациях внешнего магнитного поля не выходит за пределы развертки ФМР-спектрометра.

Измерения проводились с помощью спектрометра E-4 фирмы „Varian“ на частоте 9.54 GHz, которой в изотропном безграничном ферромагнетике с гиромагнитным отношением, как у ионов Fe^{3+} , соответствует резонансное поле $H_{is} = 3400 \text{ Oe}$. Если при перпендикулярном (параллельном) резонансе резонансное поле $H_{\perp} < H_{is}$ ($H_{\parallel} > H_{is}$), то пленка является магнитоодноосной (эффективное поле одноосной магнитной анизотропии $H_{K\text{eff}} = H_K - 4\pi M_s > 0$, где H_K — поле одноосной магнитной анизотропии, $4\pi M_s$ — намагниченность насыщения), а при $H_{\perp} > H_{is}$ ($H_{\parallel} < H_{is}$) она обладает анизотропией типа „легкая плоскость“ ($H_{K\text{eff}} < 0$).

СВЧ-поле прикладывали перпендикулярно плоскости пленки. Ориентацию внешнего магнитного поля описывали азимутальным φ и полярным θ углами, причем угол θ отсчитывали от нормали к плоскости пленки. Кристаллографические направления в плоскости пленки определяли, исходя из ориентации полосовых доменов в плоскости пленки [19] и вида поперечных петель гистерезиса [20].

В настоящей работе обсуждаются результаты исследования двух образцов со следующими параметрами: толщина пленки $h = 13 \mu\text{m}$, равновесная ширина доменов $w = 15 \mu\text{m}$, поле насыщения по нормали к пленке $H_s = 13 \text{ Oe}$ для образца № 1 и $h = 11 \mu\text{m}$, $w = 13 \mu\text{m}$ и $H_s = 16 \text{ Oe}$ для образца № 2. Заметим, что образец № 1 обладает более сильной магнитной анизотропией.

На рис. 1 и 2 представлены спектры ФМР, наблюдавшиеся при параллельном резонансе ($\theta = 90^\circ$) в образцах № 1 и № 2 соответственно. Заметим, что расположенные рядом спектры получены при направлениях внешнего магнитного поля, различающихся на 180° . Видно, что, в основном, формы этих соседних спектров, диапазоны магнитных полей, которые они занимают, и амплитуды пиков поглощения не различаются. Это свидетельствует о том, что имеет место 180° симметрия.

Из рис. 1 видно, что спектр ФМР при параллельном резонансе содержит, по меньшей мере, два пика. Наиболее интенсивный (низкополевой) пик следует отнести к основному объему пленки, а высокополевой — к слою с повышенной магнитной анизотропией. Слабые дополнительные пики, наблюдающиеся при некоторых значениях φ , могут быть обусловлены возбуждением

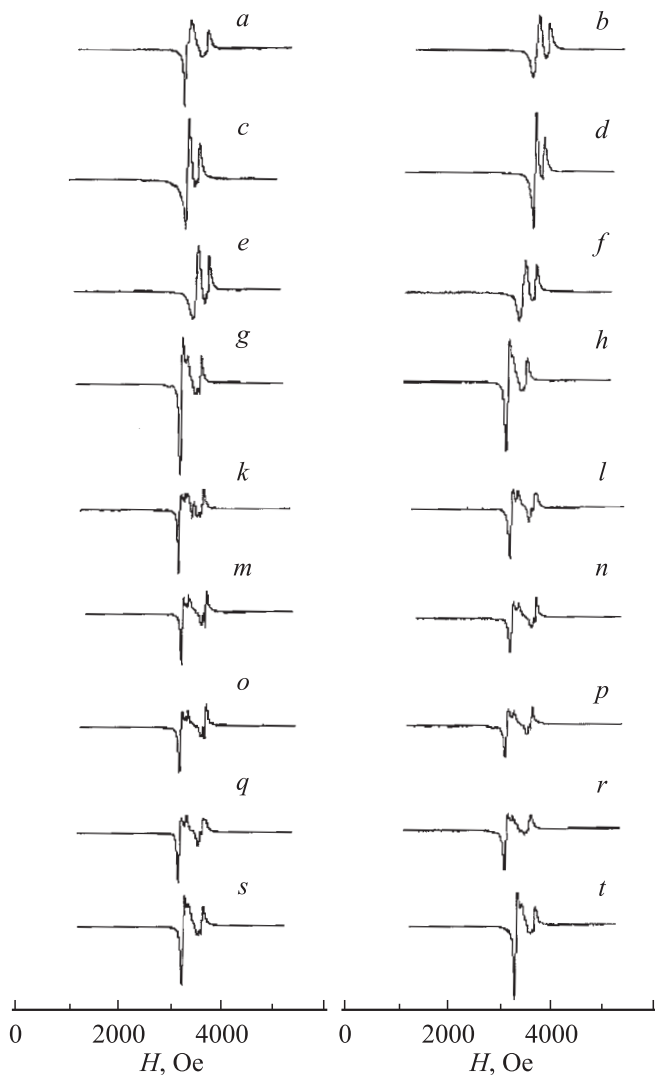


Рис. 1. Спектры параллельного резонанса ($\theta = 90^\circ$) в образце № 1 при разных азимутальных углах φ , degree: *a* — 20; *b* — 200; *c* — 40; *d* — 220; *e* — 60; *f* — 240; *g* — 80; *h* — 260; *k* — 100; *l* — 280; *m* — 120; *n* — 300; *o* — 140; *p* — 320; *q* — 160; *r* — 340; *s* — 180; *t* — 0.

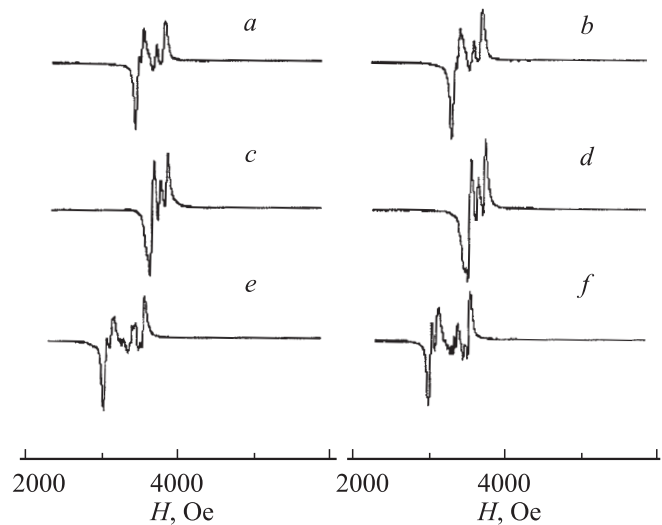


Рис. 2. Спектры параллельного резонанса ($\theta = 90^\circ$) в образце № 2 при разных азимутальных углах φ , degree: *a* — 10; *b* — 190; *c* — 50; *d* — 230; *e* — 100; *f* — 280.

спин-волнового резонанса [21,22], а также тем, что пленка является более многослойной. При изменении ориентации внешнего магнитного поля спектр ФМР (рис. 1) трансформируется, однако во всех случаях наиболее интенсивный пик расположен слева.

Спектр параллельного резонанса образца № 2 более сложный (рис. 2), однако 180° симметрия также четко проявляется.

На рис. 3 и 4 показаны спектры ФМР, наблюдающиеся для образца № 1 при изменении полярного угла θ в плоскостях, перпендикулярных плоскости пленки и задаваемых азимутальными углами $\varphi = 120^\circ$ (рис. 3) и 210° (рис. 4), которые при параллельном резонансе соответствуют минимуму и максимуму резонансного поля соответственно. Как и на рис. 1 и 2, расположенные рядом спектры получены при направлениях внешнего магнитного поля, различающихся на 180° . Видно, что, как и при параллельном резонансе, в основном, формы этих соседних спектров, диапазоны магнитных полей, которые они занимают, и амплитуды пиков поглощения не различаются.

Из рис. 3 видно, что число регистрируемых пиков зависит от θ . При перпендикулярном резонансе ($\theta = 0$) два основных пика наиболее удалены друг от друга (рис. 3, *a, b*). По мере увеличения отклонения внешнего магнитного поля от нормали к пленке эти пики все больше сближаются, пока не перекроются при $\theta = \pm 60^\circ$ (рис. 3, *e, f, k, l*). Далее пики меняются местами (рис. 3, *g, h*). Указанные закономерности имеют место и для других плоскостей, перпендикулярных плоскости пленки (рис. 4).

В эксперименте регистрировали угловые зависимости резонансных полей для двух основных пиков. Резонансное поле принимали равным полусумме значений внешнего магнитного поля, соответствующих экстремумам

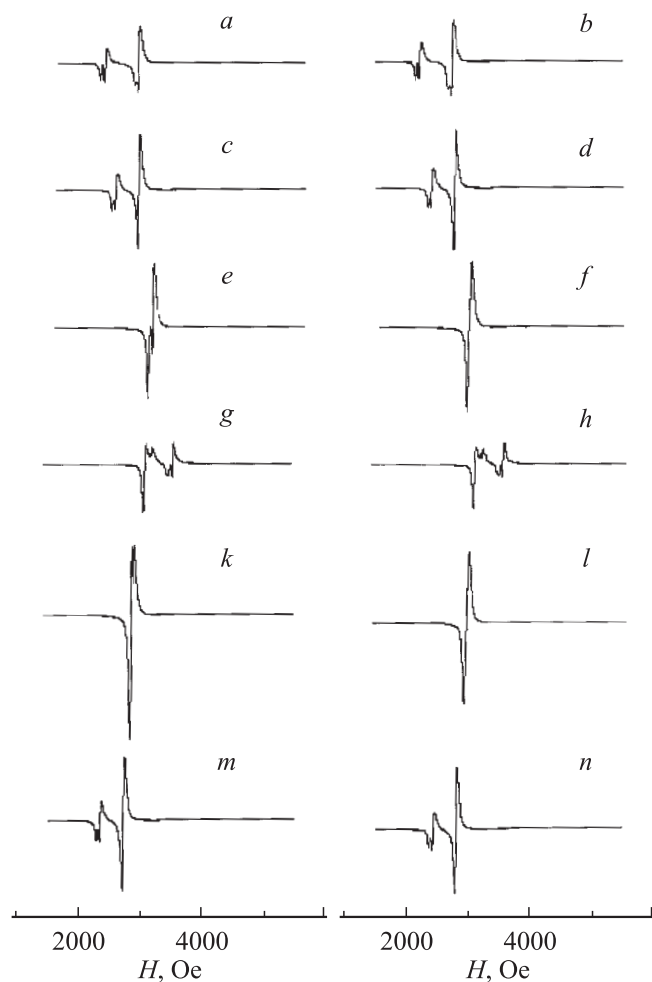


Рис. 3. Спектры ФМР в образце № 1 при варьировании полярного угла θ в плоскости, перпендикулярной плоскости пленки и задаваемой азимутальным углом $\varphi = 120^\circ$, для разных значений θ , degree: *a* — 0; *b* — 180; *c* — 30; *d* — 210; *e* — 60; *f* — 240; *g* — 90; *h* — 270; *k* — 120; *l* — 300; *m* — 150; *n* — 330.

производной сигнала поглощения. В тех случаях, когда этому мешали другие пики, значение резонансного поля принимали равным координате точки на линии нулевой интенсивности.

Из рис. 5 видно, что для основного объема пленки, обладающего пониженной магнитной анизотропией, резонансное поле в плоскости (кривая 1) изменяется сильнее, чем для переходного поверхностного слоя с повышенной магнитной анизотропией (кривая 2). Кривая $H(\varphi)$ свидетельствует о наличии магнитной анизотропии в плоскости пленки.

Из рис. 6 видно, что, как для основного объема пленки (кривая 1), так и для переходного поверхностного слоя (кривая 2) резонансные поля изменяются практически на одну и ту же величину, причем ход обеих кривых отличается незначительно.

Азимутальные (рис. 5) и полярные (рис. 6) зависимости резонансных полей подтверждают наличие 180°

симметрии как для плоскости пленки, так и для плоскостей, перпендикулярных плоскости пленки.

Вследствие наличия 180° симметрии для исследуемых пленок (в отличие от магнитоодноосных) пространственное распределение полной свободной энергии образует фигуру, не являющуюся эллипсоидом вращения. Сечения этой фигуры как в плоскости пленки, так и в плоскости, содержащей нормаль к пленке, являются эллипсами.

Ширина линии ФМР при параллельном резонансе для основного объема пленки и переходного поверхностного слоя (рис. 1) практически не зависит от ориентации внешнего магнитного поля в плоскости пленки. При варьировании полярного угла ширина линии ФМР изменяется и, в частности, возрастает примерно вдвое при перекрытии линий ФМР для основного объема пленки и переходного поверхностного слоя (рис. 3, *e, f, k, l*; рис. 4, *g, h*).

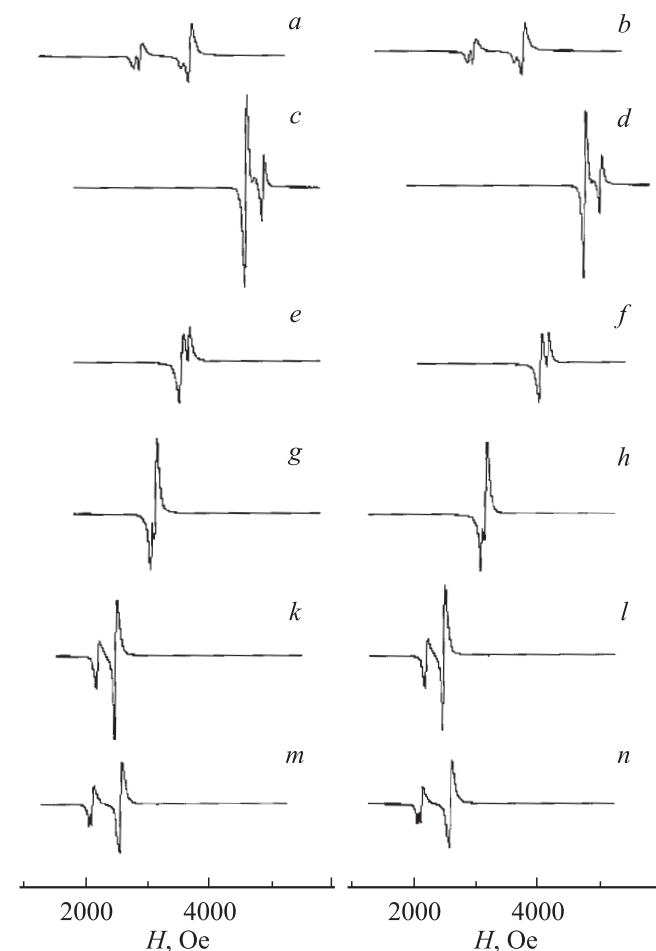


Рис. 4. Спектры ФМР в образце № 1 при варьировании полярного угла θ в плоскости, перпендикулярной плоскости пленки и задаваемой азимутальным углом $\varphi = 210^\circ$, для разных значений θ , degree: *a* — 20; *b* — 200; *c* — 40; *d* — 220; *e* — 90; *f* — 270; *g* — 100; *h* — 280; *k* — 130; *l* — 310; *m* — 170; *n* — 350.

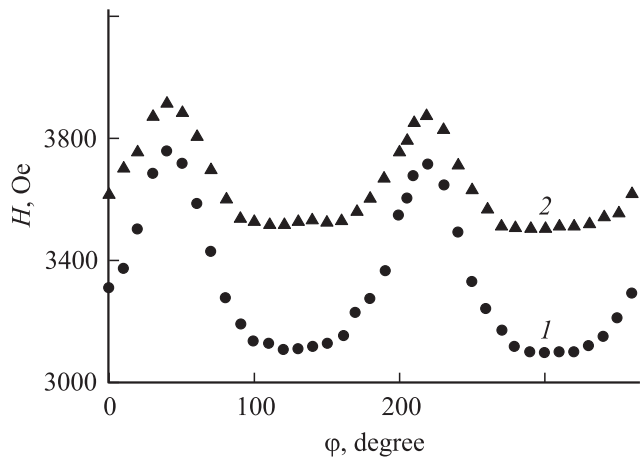


Рис. 5. Азимутальные зависимости резонансных полей для образца № 1 при параллельном резонансе ($\theta = 90^\circ$) для пиков, связанных с основным объемом пленки (кривая 1) и переходным поверхностным слоем (кривая 2).

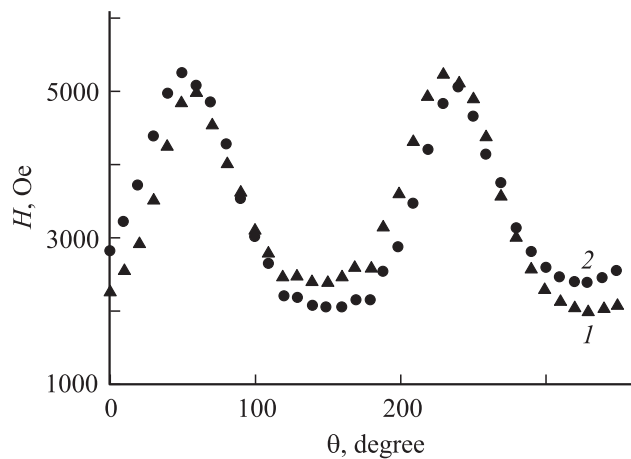


Рис. 6. Полярные зависимости резонансных полей для образца № 1 при варьировании полярного угла θ в плоскости, перпендикулярной плоскости пленки и задаваемой азимутальным углом $\varphi = 210^\circ$, для пиков, связанных с основным объемом пленки (кривая 1) и переходным поверхностным слоем (кривая 2).

Таким образом, исследование ФМР в эпитаксиальных пленках феррита-граната $(\text{Bi,Lu})_3(\text{Fe,Ga})_5\text{O}_{12}$, выращенных на подложках ГТГ с ориентацией (210) показало, что:

— исследуемые Вс-МПФГ являются слоистыми, причем основной объем пленки обладает пониженной магнитной анизотропией;

— азимутальная и полярные зависимости резонансных полей для основного объема пленки и переходного поверхностного слоя обладают 180° симметрией;

— при варьировании азимутального угла относительное положение пиков, связанных с основным объемом пленки и переходным поверхностным слоем, не изме-

няется, тогда как при варьировании полярного угла эти пики меняются местами;

— при перекрытии пиков, связанных с основным объемом пленки и переходным поверхностным слоем, в процессе варьирования полярного угла ширина линии ФМР возрастает.

Список литературы

- [1] Червоненкис А.Я. Магнитооптические устройства хранения и обработки информации. М.: Знание, 1978.
- [2] Рыбак В.И., Червоненкис А.Я. // Зарубежная электронная техника. 1980. № 4. С. 1.
- [3] Paroli P. // Thin Solid Films. 1984. 114. N 1/2. P. 187.
- [4] Звездин А.К., Котов В.А. Магнитооптика тонких пленок. М.: Наука, 1988.
- [5] Рандошкин В.В., Червоненкис А.Я. Прикладная магнитооптика. М.: Энергоатомиздат, 1990.
- [6] Рандошкин В.В. // Заводская лаборатория (Диагностика материалов). 1997. Т. 63. № 2. С. 21.
- [7] Грошенко Н.А., Прохоров А.М., Рандошкин В.В., Тимошечкин М.И., Шапошников А.Н., Ширков А.В., Степанов Ю.И. // ФТТ. 1985. Т. 27. № 6. С. 1712.
- [8] Рандошкин В.В. // Заводская лаборатория (Диагностика материалов). 1997. Т. 63. № 11. С. 26.
- [9] Рандошкин В.В. // Заводская лаборатория (Диагностика материалов). 1997. Т. 63. № 12. С. 30.
- [10] Рандошкин В.В. Динамика доменных стенок в висмутосодержащих монокристаллических пленках феррит-гранатов. Докт. дис. 2003.
- [11] Gangulee K., Kobliska R. // J. Appl. Phys. 1980. Vol. 51. N 6. P. 3333.
- [12] Телеснин Р.В., Зюзин А.М., Рандошкин В.В., Старостин Ю.В. // ФТТ. 1982. Т. 24. № 4. С. 1166.
- [13] Рандошкин В.В., Козлов В.И., Мочар В.Ю., Васильева Н.В., Воронов В.В. // ЖТФ. 1998. Т. 68. Вып. 5. С. 113.
- [14] Гуревич А.Г. Магнитный резонанс в ферритах и антиферромагнетиках. М.: Наука, 1973.
- [15] Рандошкин В.В., Козлов В.И., Мочар В.Ю., Васильева Н.В., Воронов В.В. // ЖТФ. 1997. Т. 67. Вып. 8. С. 135.
- [16] Рандошкин В.В., Козлов В.И., Мочар В.Ю., Васильева Н.В., Еськов Н.А., Дурасова Ю.А. // ФТТ. 1999. Т. 41. № 7. С. 1254.
- [17] Marusko M., Maziewski A., Stankiewicz A., Tekielak M., Volkov V.V. // Physica B. 1993. Vol. 190. P. 190.
- [18] Klin V.P., Nam B.P., Solov'ov A.G., Bogunov V.G., Levenko L.A. // IEEE Trans. Magn. 1990. Vol. 26. P. 2780.
- [19] Pyicheva E.N., Klushina A.V., Peterson V.K., Shirokova N.V., Shishkov A.G. // J. Magn. Mater. 1995. Vol. 148. P. 251.
- [20] Рандошкин В.В., Ильичева Е.Н., Дурасова Ю.А., Колотов О.С., Гусев М.Ю., Козлов Ю.Ф., Неустроев Н.С. // Заводская лаборатория (Диагностика материалов). 2002. Т. 68. № 12. С. 44.
- [21] Зюзин А.М., Куделькин Н.Н., Рандошкин В.В., Телеснин Р.В. // ЖТФ. 1983. Т. 53. Вып. 1. С. 174.
- [22] Зюзин А.М., Куделькин Н.Н., Рандошкин В.В., Телеснин Р.В. // Письма в ЖТФ. 1983. Т. 9. Вып. 3. С. 177.