

ДИНАМИКА ДОМЕННЫХ СТЕНОК

В ПЛЕНКАХ ФЕРРИТ-ГРАНАТА $(Y, Lu)_1Bi_2(Fe, Ga)_5O_{12}$
С ОРТОРОМБИЧЕСКОЙ АНИЗОТРОПИЕЙ

В. В. Рандошкин, В. Б. Сизачев, В. И. Чани, А. Я. Червоненки

Сообщается о разработке магнитооптических монокристаллических пленок (МПФГ) состава $(Y, Lu, Bi)_3(Fe, Ga)_5O_{12}$ с орторомбической магнитной анизотропией (ОРМА). Динамику доменных стенок (ДС) в этих материалах исследовали методом высокоскоростной фотографии. Кроме ярко выраженной анизотропии скорости движения ДС, обнаружен эффект анизотропного локального вращения намагниченности перед движущейся ДС, который характеризуется достаточно низким порогом. Вращение намагниченности, локализованное на удаление ~ 1 мкм от ДС, наблюдается только перед теми ее участками, которые ориентированы перпендикулярно оси ОРМА в плоскости МПФГ. Вследствие эффекта локального вращения намагниченности динамические домены могут принимать необычную ромбовидную форму.

Для магнитооптических приложений (управляемых транспарантов, фарадеевских модуляторов и др.) необходимы монокристаллические пленки феррит-гранатов (МПФГ), характеризующиеся одновременно высокими значениями: а) фарадеевского вращения ($\theta \geq 10^6$ град/м на длине волны $\lambda = 600$ нм), б) подвижности доменных стенок (ДС) ($\mu > 10$ м/с·Э), в) скорости насыщения ДС ($v_s \geq 10^2$ м/с) [1]. Эта задача может быть решена путем одновременного выполнения следующих условий: а) обеспечения высокого содержания ионов Bi^{3+} в МПФГ [1], б) отсутствия в МПФГ быстрорелаксирующих ионов [2], в) реализации в МПФГ орторомбической магнитной анизотропии (ОРМА) [3]. Разработанные к настоящему времени Bi -содержащие МПФГ с ОРМА [4, 5] при высоких динамических параметрах обладают низкими магнитооптическими характеристиками, что связано с относительно малым содержанием висмута в МПФГ.

Известно, что ОРМА в МПФГ с ориентацией (110) приводит не только к повышению предельной скорости стационарного движения ДС, но и к ее анизотропии [6]. Теория [6] предсказывает, что при ориентации блоховской ДС параллельно оси ОРМА предельная скорость ее движения выше, чем предельная скорость при перпендикулярной ориентации. Эксперименты, выполненные методом ВСФ [7, 8], выявили анизотропию скорости движения ДС и связанную с ней эллиптическую форму динамических цилиндрических магнитных доменов (ЦМД), а также возможность переключения эллиптических искажений ЦМД в динамике [8].

В настоящей работе сообщается о разработке магнитооптических МПФГ состава $(Y, Lu, Bi)_3(Fe, Ga)_5O_{12}$ с ОРМА, содержащих ионы Bi^{3+} в концентрации до 2 и более на формульную единицу граната [9]. Исследованы особенности нелинейной динамики ДС ЦМД в указанных МПФГ. Обнаружен эффект анизотропного локального вращения намагниченности перед участками ДС ЦМД, ориентированными перпендикулярно оси ОРМА.

Скорость роста при эпитаксии МПФГ, ориентированных по (110), как правило, в несколько раз ниже по сравнению с ориентацией (111) [10, 11]. Последнее является причиной существенного снижения коэффициента распределения Bi^{3+} . Синтез МПФГ осуществляли из растворов—расплавов на основе $PbO-Bi_2O_3-B_2O_3$, состав которых соответствовал метастабиль-

ной фазовой области кристаллизации феррит-граната [12]. Такие системы характеризуются повышенной стабильностью кинетики кристаллизации, что позволяет получать материалы с высокой однородностью свойств по толщине пленки [12] (метастабильной фазовой области соответствуют системы, обедненные редкоземельным компонентом). Кроме того, согласно [13, 14], снижение концентрации редкоземельного компонента в гранатообразующих растворах—расплавах сопровождается увеличением скорости роста кристаллов феррит-граната в направлении (110).

Однако относительно высокие для ориентации (110) скорости роста (≈ 0.5 мкм/мин) далеко не всегда обеспечивают увеличение концентрации Bi^{3+} в МПФГ. Так, до недавнего времени полагали [15], что для этого следует использовать редкоземельные компоненты с малым ионным радиусом с целью компенсации растяжения решетке большим ионом Bi^{3+} . Последние наши эксперименты показали обратное. Для определения допустимого содержания Bi^{3+} нами проводилось выращивание из различных типов растворов—расплавов. Максимально полученные концентрации Bi^{3+} для Lu- и Y-содержащих МПФГ (при близких условиях синтеза) составляли соответственно 1.7 и 2.1 на формульную единицу граната. На основании изложенного можно заключить, что ионы Y^{3+} являются более «равновесными» для структуры феррит-граната по сравнению с Lu^{3+} ; энергетический выигрыш от замены Lu^{3+} на Y^{3+} может быть использован для введения дополнительного количества существенно неравновесного (по данным [16]) иона Bi^{3+} . Анализируя данные [16] в этом аспекте, наиболее оптимальным, с точки зрения получения МПФГ с высокой концентрацией Bi^{3+} (в ряду редкоземельных ионов с малым параметром затухания, обеспечивающих получения МПФГ с высокой μ [11] Lu^{3+} , Y^{3+} , Gd^{3+} , La^{3+}), следует считать Gd^{3+} . Изложенное коррелирует с экспериментальными данными [17]. Однако отсутствие на сегодняшний день качественных подложечных материалов с более высоким параметром решетки, чем у $\text{Nd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ ($a = 1.2509$ нм), не позволяет подтвердить изложенные выше выводы на практике без существенного снижения содержания ионов Bi^{3+} в МПФГ.

Параметры МПФГ состава $(\text{Y, Lu, Bi})_3(\text{Fe, Ga})_5\text{O}_{12}$

Ориентация	h , мкм	P_0 , мкм	l , мкм	H_0 , Э	$4\pi M$, Гс	H_k , Э	$H_{кр}$, Э	T_N , °С	θ , 10^4 град/см
(110)	11.0	11.1	0.36	186	262	2250	725	220	1.75
(111)	8.1	9.4	0.36	180	170	4280	—	194	1.51

Введение ионов Lu^{3+} в состав МПФГ в настоящей работе обусловлено исключительно необходимостью согласования параметров решетки подложки $\text{Nd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ и пленки. При этом содержание Lu^{3+} в МПФГ было на порядок ниже по сравнению с содержанием Y^{3+} . Следует отметить, что, как и в [4], реализовать орторомбическую анизотропию в МПФГ $(\text{Lu, Bi})_3(\text{Fe, Ga})_5\text{O}_{12}$, не содержащих Y^{3+} , нам не удалось.

В работе приводятся данные для МПФГ с ОРМА, основные параметры которой даны в таблице, где h — толщина пленки; P_0 — период равновесной лабиринтной доменной структуры в отсутствие поля смещения, l — характеристическая длина, H_0 — поле коллапса ЦМД, $4\pi M$ — намагниченность насыщения, H_k — поле одноосной магнитной анизотропии, $H_{кр}$ — поле ОРМА, T_N — температура Нееля, Θ — удельное фарадеевское вращение на длине волны $\lambda = 0.63$ мкм. Для сравнения в таблице приведены основные параметры МПФГ аналогичного состава, полученной на подложке гадолиний-галлиевого граната с ориентацией (111).

Динамику ДС изучали методом высокоскоростной фотографии на установке с временным разрешением 5 нс и пространственным разрешением ≈ 0.4 мкм. Исследовали динамику ДС при расширении ЦМД [18], а также динамику ДС домена с обратной намагниченностью, который зарождался на

точечном дефекте МПФГ при ее перемагничивании из насыщенного состояния.

В исходном состоянии ЦМД находился в постоянном магнитном поле смещения $H_{см}$, близком к полю коллапса. Расширение ЦМД осуществлялось под действием импульса магнитного поля с амплитудой H_n , который создавался плоской 5-витковой катушкой с внутренним диаметром 1.7 мм и прикладывался в направлении, противоположном $H_{см}$. Длительность фронта импульса поля составляла 16 нс. Регистрировали динамические домены в центре катушки. Если в статике ЦМД имели форму, близкую к круговой, то в динамике из-за анизотропии скорости движения ДС ЦМД приобретали ярко выраженную эллиптическую форму. Микрофотографии динамических ЦМД при разных амплитудах поля в различные моменты времени t показаны на рис. 1, 2. Зависимости скорости движения участков

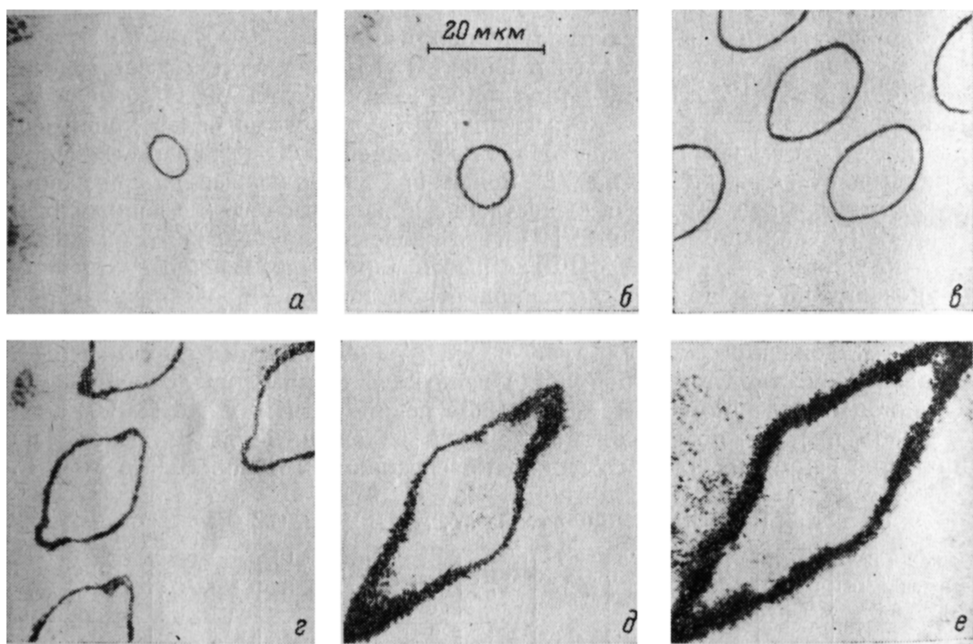


Рис. 1. Динамические ЦМД в момент времени $t=0.09$ мкс при $H_{см}=182$ Э и различных амплитудах импульсного магнитного поля.

H_n , Э: а — 22.8, б — 65.4, в — 179, г — 216, д — 338, е — 459.

ДС, ориентированных параллельно $v_{||}$ и перпендикулярно v_{\perp} оси ОРМА, приведены на рис. 3. Измерение v проводили в течение первых 30 нс после достижения полем амплитудного значения, так как в дальнейшем наблюдались магнитостатические искажения формы ЦМД [18] (именно такие искажения рассмотрены в [8]). В малых импульсных полях ($H_n \leq 50$ Э) $v_{||} > v_{\perp}$, что качественно согласуется с выводом теории [6]. Однако с ростом H_n происходит изменение знака анизотропии скорости движения ДС. В результате этого большая ось эллиптического ЦМД поворачивается на угол, близкий к 90° (рис. 1). Изменение знака анизотропии скорости движения ДС происходит в относительно узком интервале импульсных полей шириной до 10 Э. Следует отметить, что в этом интервале полей наблюдаются как эллиптические, так и круговые ЦМД. С ростом H_n ориентация большой оси не изменяется, а анизотропия скоростей $v_{||}$ и v_{\perp} возрастает.

Изменение знака анизотропии скорости движения ДС ЦМД объяснения в рамках теории [6] не находит. Вероятно, наблюдаемый эффект является следствием динамического преобразования структуры ДС ЦМД, в результате которого изменяются скорости участков ДС, по-разному ориентированных по отношению к оси ОРМА. Известно, что в МПФГ

с ОРМА могут существовать два типа статически равновесных ЦМД [1, 19]: эллиптические E и круговые C . E -ЦМД имеют две пары вертикальных блоховских линий (БЛ), каждая из которых связана статически равновес-

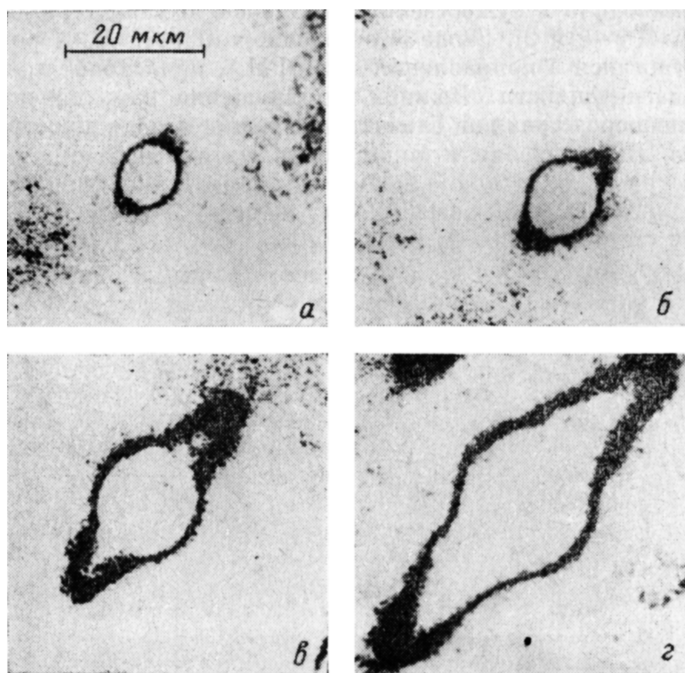


Рис. 2. Динамические ЦМД при $H_{см}=182$ и $H_{н}=264$ Э в различные моменты времени t , мкс: а — 0.05, б — 0.07, в — 0.11, г — 0.16.

ными горизонтальными БЛ в участках ДС, ориентированных перпендикулярно оси ОРМА. C -ЦМД блоховских линий не содержит и имеет нелевскую структуру в участках ДС, ориентированных перпендикулярно оси ОРМА. Появление E -ЦМД в статике более выгодно только для зна-

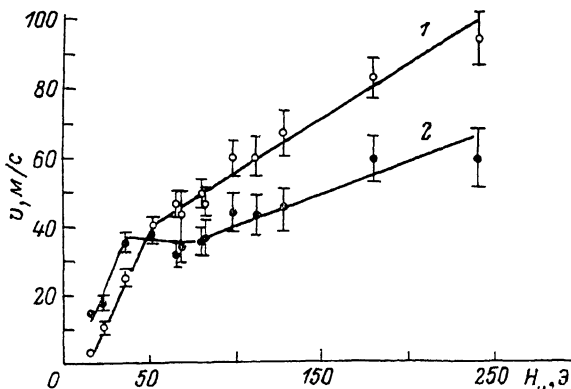


Рис. 3. Зависимости скорости движения участков ДС ЦМД, ориентированных перпендикулярно (1) и параллельно (2) оси ОРМА, от амплитуды импульсного магнитного поля.

чений фактора $Q_2 = H_{кр}/4\pi M$, не превышающих критической величины $Q_{2кр} = 1 + (\ln 2)^2 \pi M^2 h^2 / 2A$ [6, 19]. Результаты работы [19] показывают, что в динамике статически равновесные E -ЦМД могут преобразовываться в C -ЦМД. В нашем случае $Q_2 < Q_{2кр}$, поэтому в статике, вероятнее всего, реализуются E -ЦМД, а динамическое преобразование E -ЦМД в C -ЦМД

с ростом поля приводит к изменению знака анизотропии скорости движения участков ДС, ориентированных параллельно и перпендикулярно оси ОРМА.

Дальнейшее увеличение амплитуды импульсного поля в нашем эксперименте приводило к существенному изменению характера движения ДС ЦМД (рис. 1, *г—е* и 2). Выше определенного порога H_n^* перед участками ДС, движущимися в направлении оси ОРМА, происходит локальное вращение намагниченности. Важно, что вращение намагниченности начинается в непосредственной близости (с точностью до пространственного

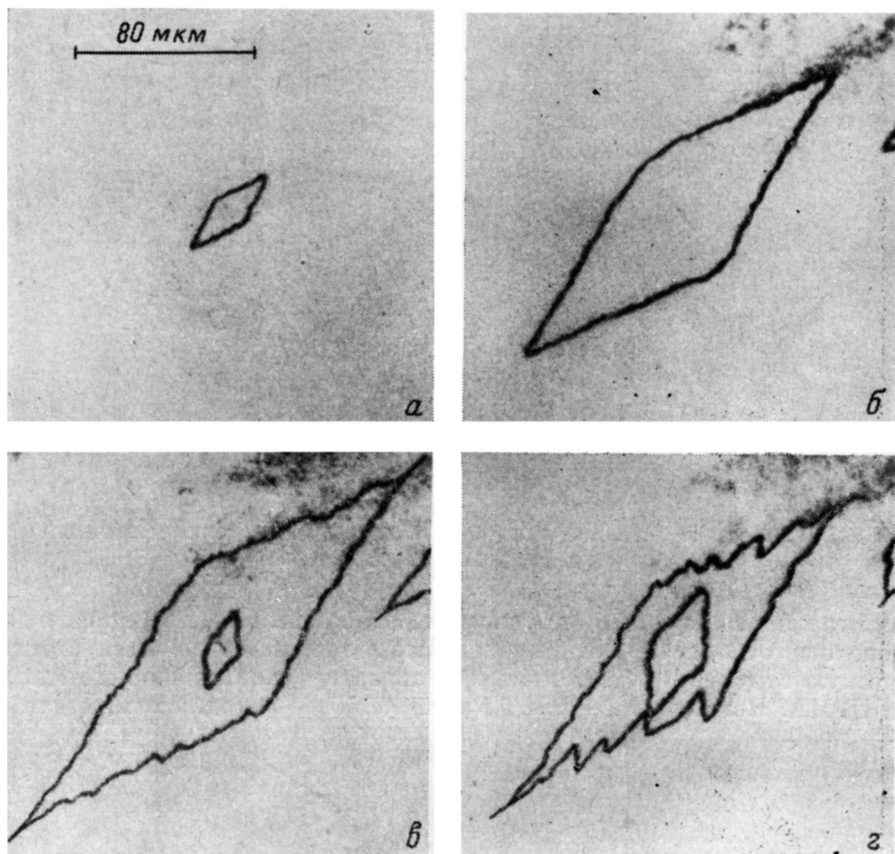


Рис. 4. Динамический ДОН, образующийся под действием импульсного поля с амплитудой $H_n=480$ Э и длительностью $\tau=0.4$ мкс при $H_{см}=230$ Э, в разные моменты времени.

t , мкс: *а* — 0.2, *б* — 0.3, *в* — 0.53, *г* — 0.57.

разрешения) от ДС на расстоянии, не превышающем 1 мкм (рис. 1, *г—е* и 2). С ростом H_n вращение намагниченности начинается в более ранние моменты времени t . Судя по контрасту на микрофотографиях, полученных при полностью скрещенных поляризаторе и анализаторе, процесс вращения намагниченности начинается, вероятнее всего, на поверхности пленки. С течением времени в этой области происходит образование сквозного микродомена, который при слиянии с эллиптическим ЦМД обуславливает возрастание его линейного размера в направлении большой оси (рис. 1, *г*). С ростом H_n расширение исходно эллиптического ЦМД постоянно сопровождается процессом локального вращения намагниченности, причем на все более возрастающем удалении от ДС. В больших полях быстрое образование сквозного домена в области вращения намагниченности приводит к тому, что исходно эллиптический ЦМД приобретает ярко выражен-

ную ромбовидную форму. При этом изображение ДС становится «диффузным», а его ширина достигает 5 мкм и более.

Очевидно, что низкий порог вращения намагниченности перед движущейся ДС ЦМД (например, при $H_{см} = 182$ Э и $t = 0.05$ мкс $H_n^* = 264$ Э) и анизотропный характер этого эффекта (т. е. ярко выраженная симметрия второго порядка) обусловлены влиянием поля орторомбической анизотропии $H_{кр}$. Поскольку исходно область вращения намагниченности локализована на поверхности пленки вплотную к ДС, то существенным фактором также является размагничивающее поле поверхностных магнитных «зарядов» (напряженность нормальной к плоскости ДС компоненты этого поля максимальна в непосредственной близости от ДС на поверхности пленки). Таким образом, внешнее действующее поле $H_n - H_{см}$, поле орторомбической анизотропии $H_{кр}$ и размагничивающее поле — это те магнитостатические факторы, которые могут определять наблюдаемый порог локального вращения намагниченности вблизи ДС. С другой стороны, поскольку промежуток времени от начала движения ДС до начала вращения намагниченности зависит от H_n , то, вероятно, имеются связанные с движением ДС определенные динамические факторы (например, какие-

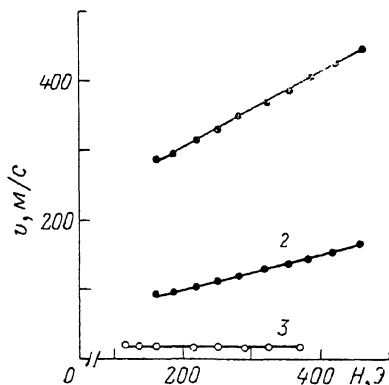


Рис. 5. Зависимости скорости движения ДС ромбовидного ДОН в направлении большой (1) и малой (2) диагоналей от продвигающего магнитного поля. Зависимость $v(H)$ для МПФГ с ориентацией (111) (3).

либо микроскопические механизмы рассеяния зеemanовской энергии), которые инициируют рассматриваемый эффект. Среди таких динамических факторов определенную роль может играть рассмотренный в [20] спин-волновой механизм. Следует отметить, что характер локализации по отношению к движущейся ДС области вращения намагниченности в МПФГ с ОРМА и зародышей микродоменов в МПФГ с ориентацией (111) существенно различается: первый эффект наблюдается вплотную к движущейся ДС, а второй — на некотором удалении от нее.

Необычную ромбовидную форму имеют и домены с обратной намагниченностью (рис. 4), зарождающиеся на точечном дефекте при импульсном перемагничивании пленки из насыщенного состояния. Механизм образования этих ромбовидных доменов аналогичен описанному для случая ЦМД. На рис. 5 приведены зависимости скорости движения ДС ромбовидного ДОН в направлении большой v_1 и малой v_2 диагоналей от продвигающего магнитного поля $H = H_n - H_{см}$. С ростом H анизотропия этих скоростей увеличивается. Для сравнения на рис. 5 показана зависимость $v(H)$ для МПФГ с ориентацией (111). Видно, что при заданном H значения v_1 и v_2 в исследованной МПФГ на порядок и более превышают скорость движения ДС в МПФГ аналогичного состава с ориентацией (111).

После окончания импульса поля внутри ромбовидного ДОН зарождается ромбовидный домен с исходной намагниченностью (рис. 4, в, г). Однако направления больших диагоналей этих доменов не совпадали. Угол между ними составлял $\approx 25^\circ$, причем ось ОРМА ориентирована в направлении биссектрисы этого угла. Изменение ориентации ДОН может быть связано с влиянием кубической анизотропии и противоположными направлениями действующих полей при зарождении доменов с обратной (во время действия импульса поля) и исходной (после окончания импульса поля) намагниченностью. Отметим, что после окончания импульса поля хорошо видна анизотропия скорости движения соседних участков исходно

прямой ДС, которая проявляется в виде «зигзагообразных» искажений ДС (рис. 4, з).

Таким образом, исследование МПФГ состава $(Y, Lu, Bi)_3(Fe, Ga)_5O_{12}$ с ориентацией (110) позволяет сделать следующие выводы.

Кроме ярко выраженной анизотропии скорости движения ДС, обнаружен эффект анизотропного локального вращения намагниченности перед движущейся ДС ЦМД.

Анизотропный характер и низкий порог этого эффекта обусловлены наличием в таких МПФГ орторомбической магнитной анизотропии.

Вращение намагниченности, исходно локализованное на удалении ~ 1 мкм, наблюдается только перед участками ДС, ориентированными перпендикулярно оси ОРМА.

Вследствие эффекта анизотропного локального вращения намагниченности динамические домены могут принимать необычную ромбовидную форму.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Балбашов А. М., Лисовский Ф. В., Раев В. К. и др. / Под ред. Евтихиева Н. Н., Наумова Б. Н. Элементы устройства на цилиндрических магнитных доменах: Справочник. М.: Радио и связь, 1987. 488 с.
- [2] Robertson J. M., Breed D. J., Algra H. A. // J. Appl. Phys. 1982. V. 53. N 3. P. 2483—2485.
- [3] Stasy W. T., Voermans A. B., Logmans H. // Appl. Phys. Lett. 1976. V. 29. N 12. P. 817—819.
- [4] Hibiya T., Makino H., Konishi S. // J. Appl. Phys. 1981. V. 52. N 12. P. 7347—7352.
- [5] Engmann T., Heidmann J., Klein D. // J. de Phys. Colloque C 6. Suppl. N 9. 1985. V. 49. P. 119—126.
- [6] Schlomann E. // J. Appl. Phys. 1976. V. 47. N 3. P. 1142—1150.
- [7] Malozemoff A. P., Papworth K. R. // J. Phys. D: Appl. Phys. 1975. V. 8. N 9. P. 1149—1155.
- [8] Иванов Л. П., Логгинов А. С., Морченко А. Т., Непокойчицкий Г. А., Рандошкин В. В., Телеснин Р. В. // ЖТФ. 1980. Т. 50. № 2. С. 404—406.
- [9] Рандошкин В. В., Сигачев В. Б., Чани В. И., Червоненкис А. Я. // Тез. докл. X Всес. школы-семинара «Новые магнитные материалы микроэлектроники». Рига, 1986. Ч. 1. С. 21—22.
- [10] Балбашов А. М., Чани В. И. Физика кристаллизации. Калинин, КГУ, 1984. В. 7. С. 40—46.
- [11] Аваева И. Г., Кошлов Ю. П., Кравченко В. Б., Лисовский Ф. В., Мансвотова Е. Г., Моносов Я. А., Соболев А. Т., Филимонова Л. М., Шахунов В. А. // Распиренные тезисы VI Междунар. конф. по росту кристаллов. М., ВИНТИ, 1980. Т. 3. С. 328—329.
- [12] Чани В. И. // Электронная техника, сер. матер. 1986. В. 5. (216). С. 57—59.
- [13] Генделев С. Ш. // Кристаллография. 1963. Т. 8. № 8. С. 431—436.
- [14] Белицкий А. В., Рудый Ю. Б., Урсуляк Н. Д., Чани В. И. // Электронная техника, сер. матер. 1981. В. 5. С. 22—25.
- [15] Бахтеузов В. Е., Ким Т. А., Рандошкин В. В., Сигачев В. Б., Чани В. И., Червоненкис А. Я. // ЖТФ. 1985. Т. 55. № 6. С. 1227—1230.
- [16] Чани В. И. // ЖТФ. 1986. Т. 56. № 1. С. 193—195.
- [17] Hibiya T., Morishide Y., Nakashima J. // Jap. J. Appl. Phys. 1985. V. 25. N 10. P. 1316—1319.
- [18] Иванов Л. П., Логгинов А. С., Непокойчицкий Г. А., Рандошкин В. В. // ФММ. 1981. Т. 51. № 6. С. 1200—1208.
- [19] Krumbholz D., Heidmann J., Engemann J., Kosinski R. A. // IEEE Trans. Magn. 1984. V. MAG-20. N 5. P. 1138—1140.
- [20] Рандошкин В. В., Сигачев В. Б. // ФТТ. 1986. Т. 28. № 5. С. 1522—1525.

Институт общей физики АН СССР
Москва

Поступило в Редакцию
20 января 1989 г.