

# Динамика доменных стенок в иттербийсодержащих пленках феррита-граната вблизи точки компенсации момента импульса

© В.В. Рандошкин, В.А. Полежаев, Н.Н. Сысоев, Ю.Н. Сажин\*

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
119899 Москва, Россия

\* Совместная хозрасчетная лаборатория «Магнитооптоэлектроника»  
Института общей физики Российской академии наук  
при Мордовском государственном университете им. Н.П. Огарева,  
430000 Саранск, Россия

(Поступила в Редакцию 18 февраля 2002 г.  
В окончательной редакции 22 июня 2002 г.)

В монокристаллических пленках феррита-граната  $(\text{Bi,Yb})_3(\text{Fe,Ga})_5\text{O}_{12}$ , выращенных методом жидкофазной эпитаксии из переохлажденного раствора-расплава на подложках  $\text{Cd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$  с ориентацией (111), изучено влияние температуры на зависимость скорости доменных стенок  $V$  от действующего магнитного поля  $H$  вблизи точки компенсации момента импульса. Показано, что в этих пленках не реализуется прецессионный механизм движения доменных стенок, но возникает внутреннее эффективное магнитное поле, снижающее действующее магнитное поле.

Одним из способов повышения быстродействия магнитооптических устройств, принцип действия которых основан на движении доменных стенок (ДС), является использование в них висмутсодержащих монокристаллических пленок феррит-гранатов (Вс-МПФГ) с компенсацией момента импульса (КМИ) [1]. В настоящее время (Вс-МПФГ) с КМИ синтезированы для всех быстрорелаксирующих редкоземельных элементов, создающих в паре с висмутом одноосную магнитную анизотропию. В число этих редкоземельных элементов входят европий [2–5], празеодим [6], диспрозий [7], гольмий [8], эрбий [9], тулий [10–13] и иттербий [14]. Пленки выращивали методом жидкофазной эпитаксии из переохлажденного раствора-расплава на изоморфных подложках.

Исследование зависимости скорости ДС  $V$  от действующего магнитного поля  $H$  в Eu-, Tm- и Er-содержащих пленках феррита-гранатов вблизи точки КМИ при разных температурах показало, что начальный участок кривой  $V(H)$  является линейным и его продолжение проходит вблизи начала координат [15]. Дальнейший ход кривой  $V(H)$  зависит от безразмерного параметра затухания  $\alpha$ . Если  $\alpha > 1$ , то за первым линейным участком следует второй линейный участок, имеющий меньший наклон, а при  $\alpha < 1$  они разделены нелинейным участком. В больших полях на кривых  $V(H)$  в ряде случаев наблюдался дополнительный (линейный или нелинейный) участок, значение дифференциальной подвижности для которого выше, чем на предшествующем участке, и даже может превышать начальную подвижность ДС [12,16]. Наличие этого участка связывают с реализацией механизма движения ДС с излучением спиновых волн (СВ) [16,17].

Цель настоящей работы — изучение влияния температуры на вид кривой  $V(H)$  в Вс-МПФГ  $(\text{Bi,Yb})_3(\text{Fe,Ga})_5\text{O}_{12}$  с КМИ, выращенных из раство-

ра-расплава на основе  $\text{PbO}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{Bi}_2\text{O}_3$  на подложках  $\text{Cd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$  с ориентацией (111). Состав шихты для выращивания эпитаксиальных пленок характеризовался следующими мольными отношениями компонентов:

$$R_1 = \text{Fe}_2\text{O}_3 / \text{Yb}_2\text{O}_3,$$

$$R_2 = \text{Fe}_2\text{O}_3 / \text{Ga}_2\text{O}_3,$$

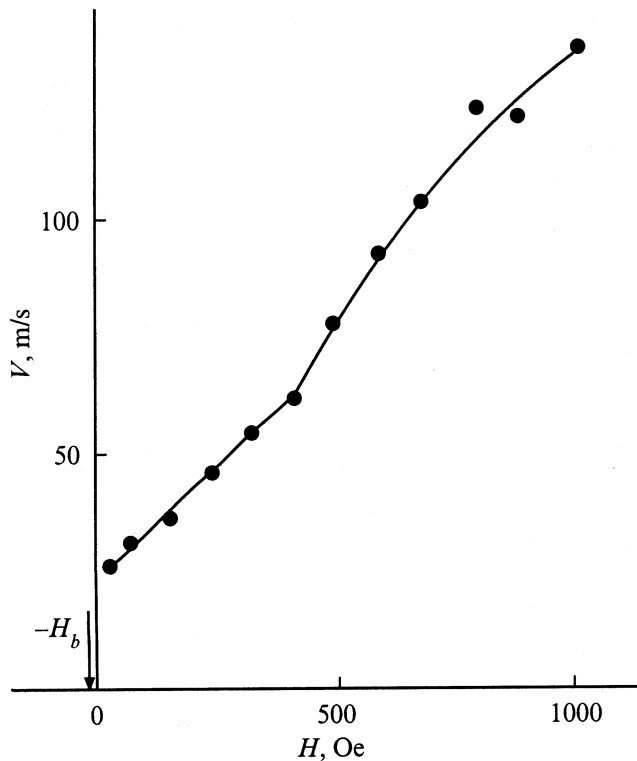
$$R_3 = (\text{PbO} + \text{Bi}_2\text{O}_3) / \text{B}_2\text{O}_3,$$

$$R_4 = (\text{Yb}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Ga}_2\text{O}_3) / (\text{Yb}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Ga}_2\text{O}_3 + \text{PbO} + \text{Bi}_2\text{O}_3 + \text{B}_2\text{O}_3).$$

Значения  $R_1-R_4$  для трех использованных растворов-расплавов (I–III) и параметры образцов, свойства которых обсуждаются в работе, приведены в таблице, где  $h$  — толщина пленки,  $W$  — равновесная ширина полосовых доменов,  $H_0$  — поле коллапса цилиндрических магнитных доменов (ЦМД),  $H_K$  — поле одноосной магнитной анизотропии,  $T_N$  — температура Нееля,  $\mu$  — начальная подвижность ДС. Арабская цифра в номере образца обозначает последовательный номер пленки в

Параметры Вс-МПФГ при комнатной температуре

№ образца	I-4	II-1	III-4	III-5
$R_1$	19.19	19.44	20.32	20.32
$R_2$	3.637	3.631	3.425	3.425
$R_3$	19.96	20.56	20.95	20.95
$R_4$	0.1197	0.1161	0.1199	0.1199
$h, \mu\text{m}$	7.1	11.4	7.5	13.2
$W, \mu\text{m}$	21.5	10.0	6.0	8.6
$H_0, \text{Oe}$	9.8	51	83	95
$H_K, \text{Oe}$	4500	730	750	810
$T_N, ^\circ\text{C}$	58	129	110	122
$\mu, \text{cm}/(\text{s Oe})$	...	78	165	153



**Рис. 1.** Зависимость скорости ДС  $V$  от действующего магнитного поля  $H$  для образца I-4. Стрелкой показано поле смещения.

серии Вс-МПФГ, выращенных при одних и тех же условиях синтеза из данного раствора-расплава, обозначенного римской цифрой. Заметим, что различие магнитных и динамических параметров образцов III-4 и III-5 свидетельствует о деградации раствора-расплава [18].

Из таблицы видно, что значения  $R_1$ – $R_4$  различаются не более чем на  $\pm 3\%$ . В таких же пределах варьируется количественный состав выращенных пленок. При переходе от раствора-расплава I к раствору-расплаву III концентрация Yb снижается ( $R_1$  увеличивается), а концентрация Ga повышается ( $R_2$  уменьшается). Это должно приводить к повышению намагниченности насыщения  $4\pi M_s$  при переходе от образцов серии I к серии II [1]. Рост величины  $4\pi M_s$  коррелирует с увеличением  $H_0$  (см. таблицу).

Измерения проводили на установке высокоскоростной фотографии [19] с помощью метода перемагничивания [20]. В исходном состоянии Вс-МПФГ намагничивали до насыщения полем смещения  $H_b$ , приложенным вдоль нормали к плоскости пленки. Импульсное магнитное поле  $H_p$  прикладывали в противоположном направлении с помощью пары плоских катушек, в центре между которыми располагался исследуемый образец. Регистрировали изображение домена с обратной намагниченностью (ДОН), зарождающегося на точечном дефекте. При достаточно большом удалении от центра зародышеобразования действующее магнитное поле

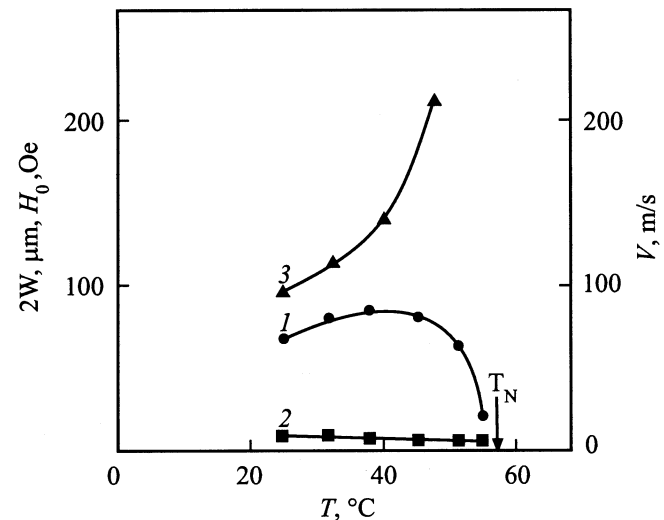
равно [20]

$$H = H_p - H_b. \quad (1)$$

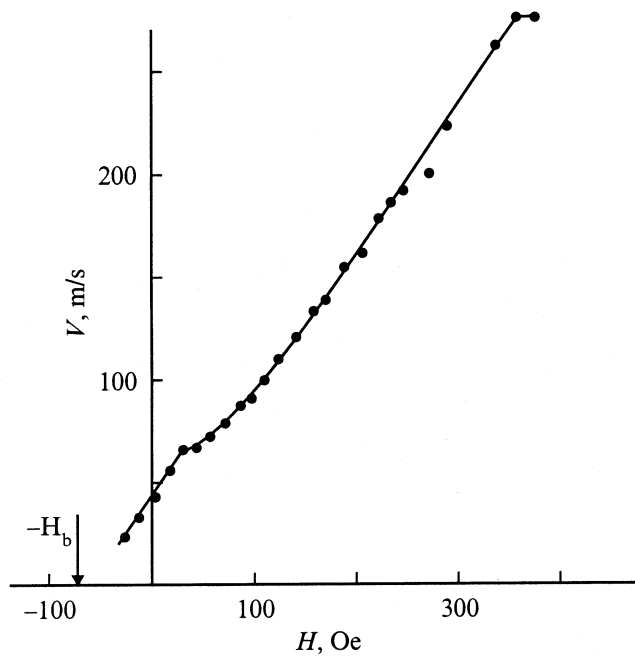
На рис. 1 приведена зависимость  $V(H)$  для образца I-4, где стрелкой показано значение поля смещения. Видно, что на кривой  $V(H)$  первый участок является линейным, характеризуется наклоном  $9.1 \text{ cm}/(\text{s Oe})$ , а его продолжение пересекает ось ординат. Указанное значение более чем на порядок меньше начальной подвижности, характерной для исследуемых пленок [14]. Это позволяет заключить, что первый наблюдаемый в эксперименте участок кривой  $V(H)$  (рис. 1) не является начальным. Используемый метод измерений [19] не позволяет проводить измерения в малых полях, поэтому начальный участок зависимости  $V(H)$  не наблюдается. Полагая, что первая экспериментальная точка на кривой  $V(H)$  (рис. 1) является последней для начального линейного участка, получаем  $\mu = 79 \text{ cm}/(\text{s Oe})$ .

Второй наблюдаемый в эксперименте участок кривой  $V(H)$  (рис. 1) является нелинейным, причем соответствующая ему дифференциальная подвижность  $\mu_0$  превышает наклон предшествующего участка. Его наличие объясняется реализацией механизма движения ДС с излучением СВ [16]. Тот факт, что он начинается при  $H < H_K$ , обусловлен наличием переходного поверхностного слоя с пониженной магнитной анизотропией в исследуемом образце.

На рис. 2 для образца I-4 показаны температурные зависимости периода равновесных полосовых доменов  $2W(T)$ , поля коллапса ЦМД  $H_0(T)$  и скорости ДС  $V(T)$  при фиксированном значении  $H = 504 \text{ Oe}$ . Увеличение скорости ДС при нагревании связано с ростом эффективного значения гиромангнитного отношения, однако для данного образца в диапазоне температур от  $0 \text{ K}$  до  $T_N$  точка КМИ отсутствует.



**Рис. 2.** Температурные зависимости периода равновесных полосовых доменов  $2W$  (1), поля коллапса ЦМД  $H_0$  (2) и скорости ДС  $V$  (3) при  $H_p = 517$  и  $H_b = 13 \text{ Oe}$  для образца I-4. Стрелкой показана температура Нееля  $T_N$ .



**Рис. 3.** Зависимость скорости ДС  $V$  от действующего магнитного поля  $H$  для образца II-1. Стрелкой показано поле смещения.

На рис. 3 приведена зависимость  $V(H)$  для образца II-1. Видно, что она состоит из двух линейных участков, разделенных нелинейным, причем наклон второго линейного участка ( $71 \text{ cm}/(\text{s Oe})$ ) лишь незначительно отличается от наклона первого линейного участка ( $78 \text{ cm}/(\text{s Oe})$ ). Если предположить, что кривая  $V(H)$  описывается одномерной теорией движения ДС, согласно которой первый и второй линейные участки (рис. 3) связаны со стационарным и прецессионным движением ДС, то с помощью соотношения [11]

$$\alpha = (\mu/\mu_0 - 1)^{-1/2} \quad (2)$$

получаем значение  $\alpha = 3.2$ . Однако при таком безразмерном параметре затухания нелинейный участок на зависимости  $V(H)$  должен отсутствовать [15]. Следовательно, участок кривой  $V(H)$ , следующий за нелинейным, хотя и является линейным, но обусловлен механизмом движения ДС с излучением СВ [12,16]. В пользу этого механизма свидетельствует также тот факт, что в узком диапазоне изменения  $H$ , расположенном на границе нелинейного и второго линейного участков кривой  $V(H)$ , имеют место пространственные искажения формы кругового ДОН, аналогичные наблюдавшимся в Тм-содержащих МПФГ вблизи КМИ [12].

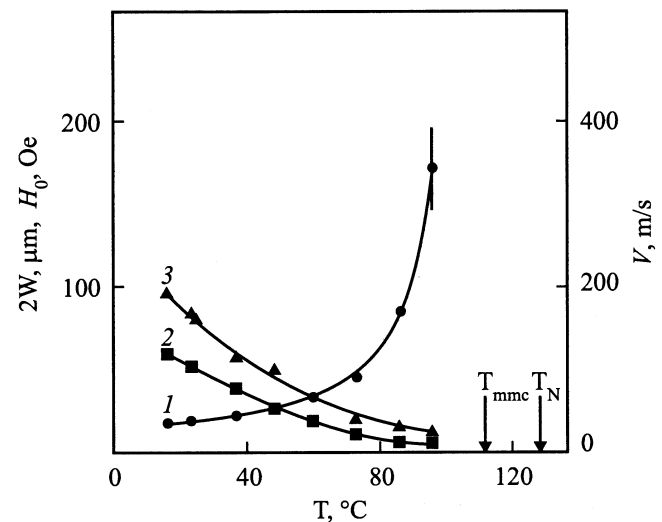
Необычным (рис. 3) является тот факт, что начальный линейный участок кривой  $V(H)$  начинается при отрицательных значениях  $H$ . Это можно объяснить наличием в пленке внутреннего эффективного магнитного поля, действующего в том же направлении, что и поле смещения. Источником этого поля может быть, например,

высококоэрцитивный переходной поверхностный слой, который не меняет своего состояния под действием импульсного магнитного поля. О возможности существования такого слоя косвенно свидетельствует то, что при нагревании основной объем пленки приближается к точке компенсации магнитного момента (КММ)  $T_{mmc}$  (рис. 4).

Заметим, что в отличие от образца I-4 для образца II-1 при нагревании равновесный период полосовых доменов монотонно увеличивается (кривая 1 на рис. 4), а скорость ДС при фиксированном  $H$  монотонно уменьшается (кривая 3 на рис. 4). Это свидетельствует о том, что точка КМИ лежит ниже комнатной температуры.

На рис. 5 и 6 приведены зависимости  $V(H)$  для образцов III-4 и III-5 соответственно. Как и в работе [14], каждая кривая  $V(H)$  состоит из начального линейного участка, нелинейного участка и участка с повышенной дифференциальной подвижностью. Как и для образца II-1, начальный линейный участок начинается при отрицательных  $H$ , а его продолжение пересекает ось абсцисс между точками  $H = -H_b$  и 0. Следовательно, внутреннее эффективное магнитное поле в Вс-МПФГ меньше поля смещения.

Температурные зависимости  $2W(T)$ ,  $H_0(T)$  и  $V(T)$  при фиксированном значении  $H$  для образцов III-4 и III-5 показаны на рис. 7 и 8 соответственно. Как и для образца II-1, для образцов III-4 и III-5 с ростом  $T$  равновесный период полосовых доменов увеличивается (кривые 1 на рис. 7 и 8), а скорость ДС при фиксированном действующем магнитном поле уменьшается (кривые 3 на рис. 7 и 8). Для всех исследованных образцов поле колласа ЦМД уменьшается при нагревании (кривые 2 на рис. 2, 4, 7 и 8). Для образца III-5 на рис. 8 (кри-



**Рис. 4.** Температурные зависимости периода равновесных полосовых доменов  $2W$  (1), поля колласа ЦМД  $H_0$  (2) и скорости ДС  $V$  (3) при  $H_p = 168$  и  $H_b = 72$  Oe для образца II-1. Стрелками показаны температура КММ  $T_{mmc}$  и температура Нееля  $T_N$ .

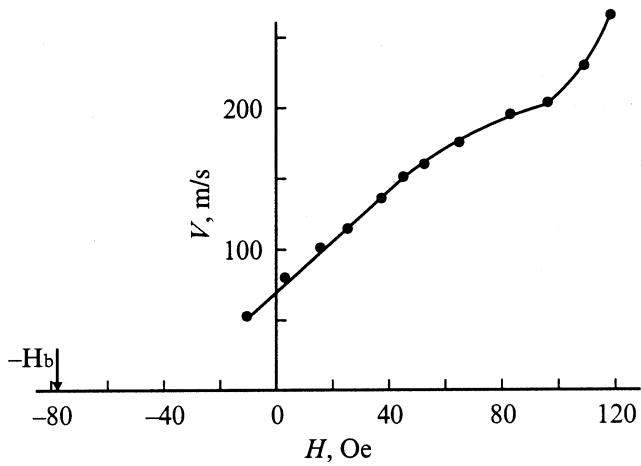


Рис. 5. Зависимость скорости ДС  $V$  от действующего магнитного поля  $H$  для образца III-4. Стрелкой показано поле смещения.

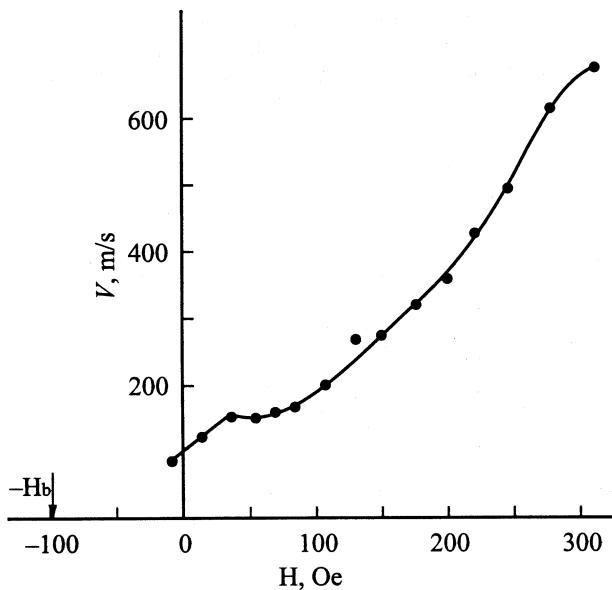


Рис. 6. Зависимость скорости ДС  $V$  от действующего магнитного поля  $H$  для образца III-5. Стрелкой показано поле смещения.

вая 4) приведена также температурная зависимость критической скорости  $V_{cr}$ , при которой заканчивается первый линейный участок. Как и для Tm-содержащих пленок [12], критическая скорость имеет максимум в точке КМИ.

На рис. 9 приведены зависимости  $V(H)$ , измеренные при разных температурах, но одинаковом поле смещения. Видно, что с ростом температуры кривые  $V(H)$  смещаются вправо. Следовательно, внутреннее эффективное магнитное поле, как и намагниченность насыщения, уменьшается при нагревании Вс-МПФГ.

Из рис. 9 видно, что наиболее протяженный начальный линейный участок кривой  $V(H)$  наблюдается

при  $T = 30.5^\circ\text{C}$ . Вблизи этой температуры находится точка КМИ. Подвижность ДС, как и следовало бы ожидать [12], снижается по мере удаления от точки КМИ.

Заметим, что на всех кривых  $V(H)$  (рис. 1, 3, 5, 6 и 9) отсутствует второй линейный участок с существенно меньшим наклоном, чем первый, который характерен для Eu- [3], Er- [9] и Tm-содержащих [12] Вс-МПФГ вблизи КМИ. Следовательно, в Yb-содержащих пленках прецессионный механизм движения ДС не реализуется. Не исключено, что какую-то роль в этом играет внутреннее эффективное магнитное поле.

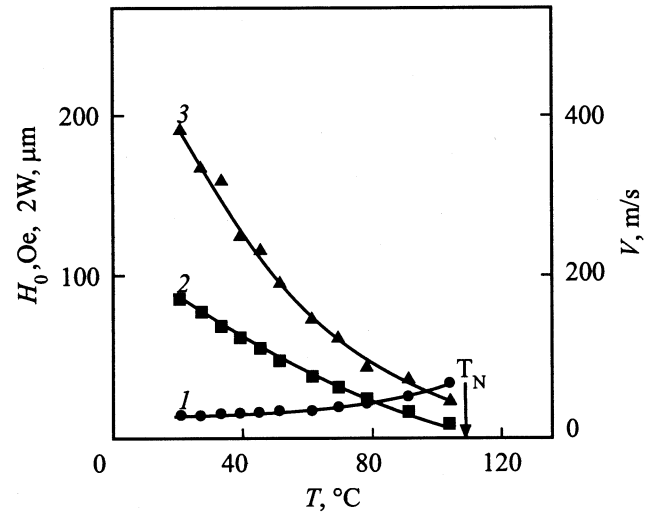


Рис. 7. Температурные зависимости периода равновесных полосовых доменов  $2W$  (1), поля коллапса ЦМД  $H_0$  (2) и скорости ДС  $V$  (3) при  $H_p = 152$  и  $H_b = 93$  Ое для образца III-4. Стрелкой показана температура Нееля  $T_N$ .

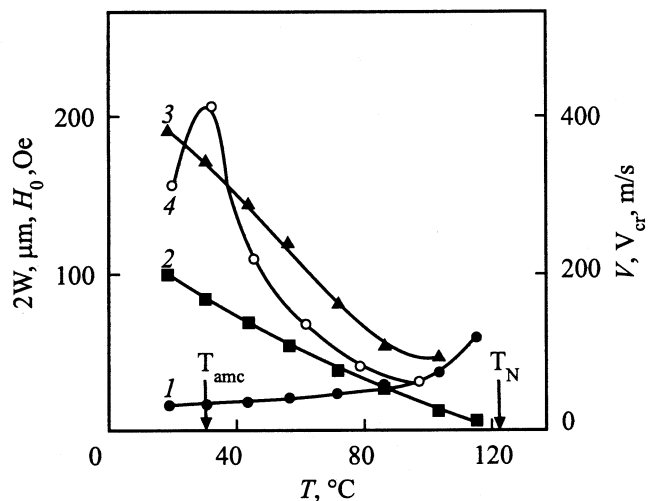
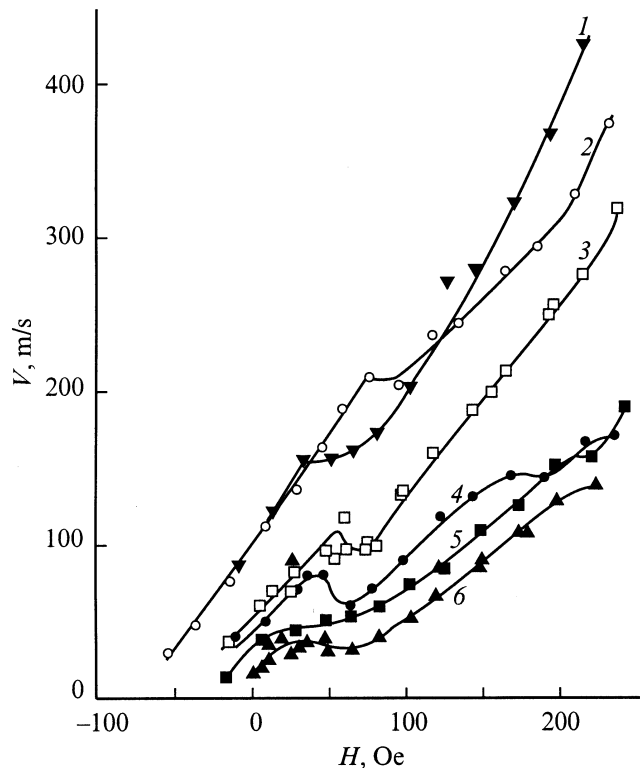


Рис. 8. Температурные зависимости периода равновесных полосовых доменов  $2W$  (1), поля коллапса ЦМД  $H_0$  (2), скорости ДС  $V$  (3) при  $H_p = 297$  и  $H_b = 99$  Ое и критической скорости  $V_{cr}$  (4), при которой заканчивается начальный линейный участок кривой  $V(H)$ , для образца III-5. Стрелками показаны температура КМИ  $T_{амс}$  и температура Нееля  $T_N$ .



**Рис. 9.** Зависимости скорости ДС  $V$  от действующего магнитного поля  $H$  для образца III-5 при поле смещения  $H_b = 100$  Ое и различных температурах.  $T, ^\circ\text{C}$ : 1 — 18, 2 — 30.5, 3 — 44, 4 — 60.5, 5 — 78.5, 6 — 96.5.

Таким образом, в настоящей работе показано, что при импульсном переманчивании Вс-МПФГ  $(\text{Bi}, \text{Yb})_3(\text{Fe}, \text{Ga})_5\text{O}_{12}$  вблизи точки КМИ: на зависимости скорости ДС от действующего магнитного поля отсутствует участок, соответствующий прецессионному механизму движения ДС; возникает внутреннее эффективное магнитное поле, снижающее действующее магнитное поле; внутреннее эффективное магнитное поле не превышает поле смещения; начальная подвижность ДС и критическая скорость, соответствующая срыву стационарного движения ДС, имеют максимум в точке КМИ.

## Список литературы

- [1] В.В. Рандошкин, А.Я. Червоненкис. Прикладная магнитооптика. Энергоатомиздат, М. (1990). 320 с.
- [2] В.И. Зоря, И.Ю. Зуева, В.В. Рандошкин, В.Б. Сигачев, М.И. Тимошечкин. ЖТФ **54**, 7, 1381 (1984).
- [3] В.В. Рандошкин, В.Б. Сигачев. ЖТФ **58**, 12, 2350 (1988).
- [4] В.В. Рандошкин, М.В. Логунов, Ю.Н. Сажин, В.И. Чани, В.П. Клиш, Е.Э. Шушера. Письма в ЖТФ **18**, 4, 71 (1992).
- [5] В.В. Рандошкин, В.В. Ефремов, Е.Э. Шушера. Письма в ЖТФ **19**, 2, 43 (1992).
- [6] В.В. Рандошкин, В.В. Ефремов, М.В. Логунов, Ю.Н. Сажин. Письма в ЖТФ **19**, 2 28 (1993).

- [7] А.А. Айрапетов, М.В. Логунов, В.В. Рандошкин, В.И. Чани, Е.Э. Шушера. Письма в ЖТФ **18**, 4, 79 (1992).
- [8] А.А. Айрапетов, М.В. Логунов, В.В. Рандошкин, В.И. Чани, Е.Э. Шушера. ФТТ **34**, 5, 1649 (1992).
- [9] В.В. Рандошкин, В.Б. Сигачев. ФТТ **29**, 9, 2658 (1987).
- [10] Н.В. Заболотная, В.В. Осико, В.В. Рандошкин, В.Б. Сигачев, М.И. Тимошечкин. Письма в ЖТФ **10**, 13, 788 (1984).
- [11] В.В. Рандошкин, В.Б. Сигачев. Письма в ЖТФ **42**, 1, 34 (1985).
- [12] В.В. Рандошкин, В.Б. Сигачев. ФТТ **32**, 10, 246 (1990).
- [13] Н.А. Логинов, М.В. Логунов, В.В. Рандошкин. ФТТ **31**, 10, 58 (1989).
- [14] А.А. Айрапетов, М.В. Логунов, В.В. Рандошкин. Письма в ЖТФ **18**, 2, 74 (1992).
- [15] В.В. Рандошкин. ФТТ **37**, 3, 652 (1995).
- [16] В.В. Рандошкин. ФТТ **39**, 8, 1421 (1997).
- [17] В.В. Рандошкин, В.Б. Сигачев. ФТТ **28**, 5, 1522 (1986).
- [18] В.В. Рандошкин, Н.В. Васильева, К.В. Сташун, М.В. Сташун. Неорган. материалы **35**, 1, 1 (1999).
- [19] В.В. Рандошкин, М.В. Логунов, В.Б. Сигачев. ПТЭ **5**, 247 (1985).
- [20] В.В. Рандошкин. ПТЭ **2**, 155 (1995).