

ДИНАМИКА КЛАСТЕРОВ БЛОХОВСКИХ ЛИНИЙ В ДОМЕННОЙ ГРАНИЦЕ ПЛЕНОК ФЕРРИТОВ-ГРАНАТОВ С ПЕРПЕНДИКУЛЯРНОЙ АНИЗОТРОПИЕЙ

*М.В. Четкин, В.Б. Смирнов, И.В. Парыгина, С.Н. Гадецкий,
В.В. Лыков, А.К. Звездин, А.Ф. Попков, А.М. Медников,
С.В. Гомонов*

Экспериментально и теоретически исследована динамика кластеров вертикальных блоховских линий в пленках ферритов-гранатов с перпендикулярной анизотропией.

Вертикальные блоховские линии (ВБЛ), разделяющие участки доменных границ (ДГ) ферромагнетиков с противоположными направлениями магнитных моментов, являются важными элементами структуры ДГ¹. Экспериментальные исследования динамики ВБЛ в эпитаксиальных пленках ферритов-гранатов с перпендикулярной анизотропией до настоящего времени выполнены не были. Эти исследования важны для понимания нелинейных процессов динамики ДГ и в связи с предложением Кониши использовать ВБЛ для создания систем сверхплотной магнитной памяти². Динамический профиль ДГ с единичной ВБЛ рассчитан в работе³. Резонансные колебания ВБЛ и влияние ВБЛ на динамику ДГ в пластинках феррита-граната иттрия исследовали Никитенко и Дедух с сотрудниками⁴. В данной работе впервые экспериментально исследована динамика кластеров ВБЛ в пленках ферритов-гранатов с перпенди-

кулярной анизотропией и приведены результаты теоретического расчета динамического профиля ДГ, содержащей кластер ВБЛ. Слончевский теоретически показал, что подвижность участков ДГ с ВБЛ существенно меньше подвижности участков ДГ без них ¹. Метод качания ДГ высокочастотным полем применялся для нахождения положений статических ВБЛ в ДГ ⁵. Однократная высокоскоростная фотография динамической ДГ позволила зафиксировать участки ДГ, движущиеся с различными скоростями ⁶, но результатов исследования динамики ВБЛ таким методом пока не было опубликовано. В данной работе для регистрации динамики ВБЛ в ДГ пленки феррита-граната с перпендикулярной анизотропией использовался метод двукратной высокоскоростной фотографии ⁷. Он позволяет зарегистрировать два положения динамической ДГ, полученные с помощью двух световых импульсов. Периоды доменной структуры в пленках толщиной 11,4 и 7 мкм были равны 85 и 47 мкм. В пленке феррита-граната с помощью градиентного магнитного поля 1500 Э/см перпендикулярного поверхности образца создавалась единственная прямолинейная ДГ. Образцы с такой ДГ помещались в импульсное магнитное поле H перпендикулярное плоскости пленки, которое вызывало движение ДГ. С помощью эффекта Фарадея, который в висмутсодержащих ферритах-гранатах необычно велик ^{8, 9}, можно было сфотографировать два положения движущейся ДГ. Такая фотография для образца № 2, на которой темная полоса — область, проходимая ДГ за время между двумя световыми импульсами, представлена на рис. 1, а. Длительность импульсов света 8 нс, время задержки — 0,4 мкс. ДГ движется вниз. На рисунке отчетливо видно, что на ДГ есть образование, отстающее от всей границы и перемещающееся вдоль нее. В этом месте на ДГ находится кластер ВБЛ. Амплитуда неоднородности на ДГ составляет 5 мкм, форма несимметрична. Неоднородность релаксирует за несколько микросекунд в образце № 1 и за несколько десятых микросекунды в образце № 2. На рис. 1, б представлен аналогичный результат, полученный при двукратном фотографировании в режиме контраста ДГ для образца № 2.

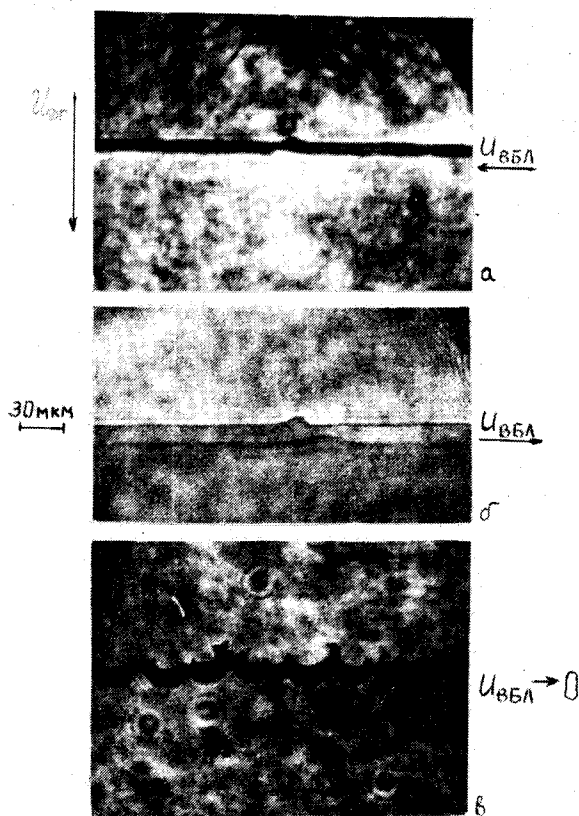


Рис. 1. Двукратные высокоскоростные фотографии динамической доменной грани — цы с кластером ВБЛ в пленке феррита-граната: а — контраст доменов $H_z = 15$ Э, б — контраст доменной границы, $H_z = 15$ Э, в — контраст доменов $H_z = 40$ Э

Скорость перемещения кластера ВБЛ вдоль ДГ нелинейно связана с величиной поля H (рис.2). С ростом H скорость кластера увеличивается, причем, в некотором интервале магнитных полей число кластеров на ДГ не изменяется. В полях выше 70 Э для образца № 1 количество кластеров увеличивается, что затрудняет определение их скорости движения вдоль ДГ. Максимальная скорость движения кластера ВБЛ в условиях нашего эксперимента составляла 15 и 57 м/с для образцов № 1 и № 2 и была почти вдвое больше скорости ДГ. Уменьшение скорости кластера ВБЛ в образце № 2 в полях выше 20 Э связано с рождением кластеров ВБЛ на всей ДГ (рис. 1, в). На зависимости скорости ДГ $u(H)$ в этом случае есть пик, после которого скорость резко уменьшается. Для образца № 1 такого пика мы не наблюдали. Изменение направления скорости ДГ приводило к изменению направления движения кластера ВБЛ. Это свидетельствует о том, что кластер ВБЛ движется под действием гиротропной силы ¹. Выход на видимое насыщение скорости ВБЛ в образце № 1 связан, по-видимому, с насыщением скорости ДГ. Определенная выше скорость ВБЛ существенно меньше предельной скорости единичной ВБЛ ¹.

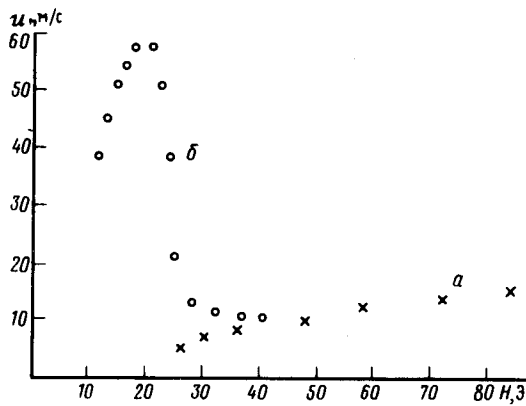


Рис. 2

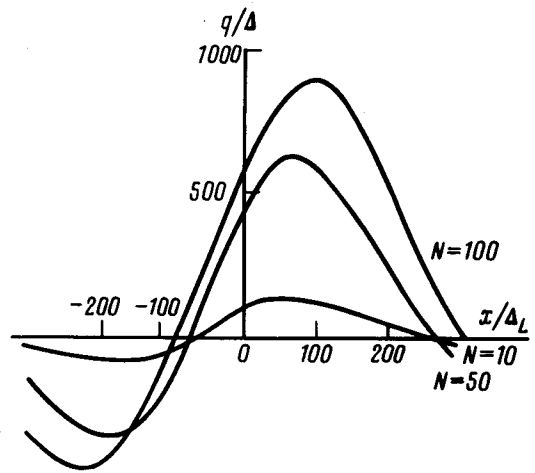


Рис. 3

Рис. 2. Зависимость скорости кластера ВБЛ вдоль ДГ от магнитного поля в образцах № 1 (а) и № 2 (б)

Рис. 3. Теоретическая форма профиля ДГ с кластером из 10, 30, и 50 ВБЛ, движущейся со скоростью $u = 15$ м/с, $\alpha = 0,2$, $h = 10$ мкм, $4\pi M = 60$ Гс, $A = 2 \cdot 10^{-7}$ эрг/см, $K/2\pi M^2 = 140$

Динамика спинов, локализованных в ДГ ферромагнетика с большим фактором качества $Q = K/2\pi M^2 \gg 1$, описывается уравнением Слончевского ¹. При малой скорости движения ВБЛ вдоль ДГ вдали от предельной скорости $u_c \sim \gamma \sqrt{8\pi A}$ автомодельное движение $\psi = \psi(x - ut)$ спинов в ДГ описывается уравнениями:

$$\frac{-uq_x}{4\pi M \gamma \Delta} = \frac{1}{2} \sin 2\psi - \Delta_L^2 \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} \quad (1)$$

$$\frac{-u\psi_x \Delta}{4\pi M \gamma} = \alpha u q_x + (\Delta_L^2 q_{xx} - b^2 q) + \frac{\Delta}{\pi h} \int_{-\infty}^{\infty} [q(x) - q(x+y)] \left[\frac{1}{|y|} - \frac{1}{\sqrt{y^2 + h^2}} \right] dy \quad (2)$$

где q — положение центра ДГ по оси y , x — координата вдоль ДГ, ψ — угол выхода намагниченности из плоскости ДГ, M — намагниченность, γ — гиромангнитное отношение, Δ — толщина стенки, $b^2 = H'_z \Delta / 4\pi M$, H'_z — градиент магнитного поля, h — толщина пленки, Δ_L — толщина ВБЛ. В первом уравнении опущен член, связанный с диссипацией, что справедливо при $\alpha u \ll 4\pi M \gamma \Delta_L$, а в уравнении (2) введено слагаемое, учитывающее поля рассеяния,

возникающие при изгибе ДГ из-за магнитных полюсов на поверхности пленки ¹⁰. В линейном приближении по скорости u левую часть (1) можно положить равной нулю. Тогда структуру кластера из N линий можно представить в виде
$$\psi = \sum_{-N/2}^{N/2} \varphi_0(x + nx_0 - ut),$$
 где x_0 —

расстояние между ВБЛ в кластере, $\varphi_0(\xi)$ — структура ВБЛ, описываемая уравнением (1). Для оценок можно считать $x_0 = \pi\Delta_L$, $\varphi_0(\xi) = 2 \arctg \exp(\xi/\Delta_L)$, $\xi = (x - ut)$. В этом случае изгиб ДГ, создаваемый при движении кластера из-за гироскопического давления, находится из уравнения (2) методом Фурье-преобразования

$$q(\xi) = 4\pi\gamma M \Delta u \int_0^{\infty} \frac{\cos(k\xi + \varphi_k) \sin\left(\frac{N}{2} k \pi \Delta_L\right)}{\sqrt{\omega_k^4 + \alpha^2 u^2 k^2} \sin(k\pi\Delta_L) \operatorname{ch} \frac{\pi k \Delta_L}{2}} dk, \quad (3)$$

где

$$\frac{\omega_k^2}{(4\pi M \gamma)^2} = b^2 + (k\Delta_L)^2 - \frac{\Delta}{\pi h} [c + \ln(kh/2) + k_0(kh)]$$

c — постоянная Эйлера, $k_0(x)$ — эллиптическая функция мнимого аргумента, $\operatorname{tg} \varphi_k = \alpha u k 4\pi\gamma M / \omega_k^2$, $N \ll 2/b$.

Когда $N \ll b^{-1}$, $b_c \ll b \ll 1$, где b_c — критическая величина "жесткости" ДГ, при которой происходит нарушение устойчивости ее плоского состояния (изгибная неустойчивость ¹¹), то из (3) следует

$$q(\xi) = \frac{uN}{8M\gamma Q^{1/2} b} \left[1 - \frac{\alpha \xi u}{\Delta_L^2 8\pi M \gamma} \right] \exp(-b |\xi| / \Delta_L). \quad (4)$$

Таким образом, форма изгиба ДГ при наличии диссипации ($\alpha \neq 0$), в отличие от ¹², несимметрична относительно центра кластера ($\xi = 0$) (рис. 3). Амплитуда величины изгиба в центре $q(0)$ зависит от числа ВБЛ в кластере N и "жесткости" стенки, характеризуемой параметром b . Максимальная величина прогиба достигается при $N \sim 2/b$ и составляет $q_{\max}(0) = u/\gamma H_2^2 \Delta_L$.

При уменьшении градиента H_z' величина прогиба ДГ и инерционность возрастают и особенно сильно в окрестности потери доменной устойчивости плоского состояния ($b \rightarrow b_c$). Форма изгиба ДГ, показанная на рис. 1 соответствует результатам теории, представленным на рис. 3. На рис. 1 отчетливо видна смена знака отклонения ДГ впереди движущегося кластера ВБЛ. Слабое различие скоростей и кластера ВБЛ связано с возрастанием силы вязкого торможения кластера, обусловленного сильным прогибом ДГ при большом числе ВБЛ. Проведенный эксперимент показал, что задача визуализации кластера с малым числом ВБЛ может быть решена.

Литература

1. Малоземов А., Слонзуски Дж. Доменные стенки в материалах с цилиндрическими доменами, М.: Мир, 1982, с. 362.
2. Konishi S. IEEE Trans. on Mag., MAG-19, 1983, 1838.
3. Matsuyama K., Konishi S. IEEE Trans on Mag. MAG-20, 1984, 1141.
4. Горнаков В.С., Дедух Л.М., Никитенко В.И., Сыногач В.Т. ЖЭТФ, 1986, 90, 2090.
5. Suzuki T., Asada M. et al. IEEE Trans on Mag. MAG-22, 1986, 784.
6. Lian M.R., Humphrey F.B. J. Appl. Phys., 1985, 57, 4065.
7. Четкин М.В., Гадецкий С.Н. Письма в ЖЭТФ, 1983, 38, 260.
8. Четкин М.В., Морозова И.В., Тютнева Г.К. ФТТ, 1967, 15, 3881.
9. Hansen P., Krumm J.P. Thin Solid Film, 1984, 14, 69.

10. *Schlömann E.* IEEE Trans. on Mag., MAG-10, 1974, 11.

11. *Hagedorn F.B.* J. Appl. Phys., 1970, 41, 1161.

12. *Звездин А.К., Попков А.Ф.* ЖЭТФ, 1986, 91, 1789; *Ходенков Г.Е.* ЖТФ, 1987, 57, 1170.

Московский государственный университет
им. М.В.Ломоносова

Поступила в редакцию
6 мая 1987 г.