

УДК 539.216.2

© 1991

ВЛИЯНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТОЧЕК БЛОХА НА ТРАНСЛЯЦИОННОЕ ДВИЖЕНИЕ ЦМД В ГРАНАТОВЫХ ПЛЕНКАХ

В. А. Боков, В. В. Волков, М. Марышко,¹ П. И. Набокин,
Н. Л. Петриченко, Э. Б. Сонин

Исследовано динамическое поведение цилиндрических магнитных доменов (ЦМД) в гранатовой пленке системы YBiCaSiFe с малым параметром диссипации α . С применением высокоскоростной регистрации получены зависимости $V(H_g)$ скорости трансляционного движения ЦМД от амплитуды импульсов продвигающего поля для доменов в состояниях: 1) с одной отрицательной вертикальной линией Блоха (ВЛБ) и одной ВЛБ с точкой Блоха; 2) с двумя ВЛБ, каждая из которых содержит точку Блоха; 3) без ВЛБ (хиральных). Измерения выполнены в присутствии постоянного планарного поля H_p . Установлено, что наклон начального участка зависимости $V(H_g)$ возрастает с увеличением H_p для всех доменов, кроме хиральных, что связано со смещением точки Блоха к поверхности пленки. С помощью экспериментальных данных получена зависимость координаты точки Блоха от величины H_p , хорошо согласующаяся с расчетной кривой.

При стационарном трансляционном движении цилиндрического магнитного домена (ЦМД) в гранатовой пленке с перпендикулярной магнитной анизотропией продвигающее магнитное поле уравновешено диссипативной, гиротропной и коэрцитивной силами реакции. Диссипативная сила определяется параметром диссипации Гильберта α , а гиротропная сила обратно пропорциональна радиусу домена и зависит от структуры стенки ЦМД, характеризуемой параметром S . Согласно [1],

$$S = h^{-1} \int_0^h I(z) dz, \quad (1)$$

где h — толщина пленки; $I(z)$ — число полных оборотов на угол 2π , совершаемых вектором намагниченности при обходе домена по периметру, образуемому пересечением границы ЦМД и плоскости с координатой z . Гиротропная сила реакции пропорциональна S . Обычно трансляционное движение ЦМД исследовалось на пленках, в которых диаметр домена равен нескольким микронам, а величина α значительна. Поэтому подвижность ЦМД определялась диссипативной силой, а гиротропия при $S \neq 0$ приводила к отклонению домена относительно направления градиента поля смещения. В случае $S=1$ угол отклонения ρ , как правило, не превышает 25° .

В [2] нами было показано, что в пленках с малым параметром диссипации ($\alpha \sim 10^{-3}$) и при радиусе ЦМД $r \sim 0.5$ мкм движение домена практически полностью определяется гиротропией и коэрцитивностью. В общем виде угол отклонения ЦМД описывается выражением

$$\rho = \text{arctg} \frac{2S(\gamma r)^{-1}}{\alpha(\gamma \Delta)^{-1} + H_c V^{-1}}, \quad (2)$$

¹ Институт физики АН ЧССР, г. Прага.

где V — скорость домена, H_c — коэрцитивное поле, Δ — параметр ширины стенки Блоха, γ — эффективное значение гиромагнитного отношения. При малом α угол отклонения не зависит от структуры стенки и

$$\rho = \arctg \left[\left(\frac{H_g}{H_c} \right)^2 - 1 \right]^{1/2}, \quad (3)$$

где продвигающее поле $H_g = r \nabla H_z$. В то же время скорость домена оказывается непосредственно связанной со структурой стенки (χ -состоянием ЦМД)

$$V = \frac{\gamma r}{2S} (H_g^2 - H_c^2)^{1/2} - \frac{\alpha \gamma r^2}{4\Delta S^2} H_c. \quad (4)$$

Из (4) следует, что при малом α скорость обратно пропорциональна S и особенно сильно зависит от S при $0 < S < 1$. Поскольку существование состояний с нецелочисленными S связывают с присутствием в границе ЦМД вертикальных линий Блоха (ВЛБ) с точками Блоха [3], скорость домена, согласно (4), должна быть очень чувствительна к наличию точек Блоха и их положению на ВЛБ. Координата же точки Блоха на ВЛБ должна зависеть от приложенного постоянного планарного поля H_p . Оба этих обстоятельства дают возможность исследовать влияние положения точек Блоха на движение ЦМД.

Измерения были выполнены на той же пленке системы YBiCaSiFe , которая исследовалась в [2]. Параметры пленки: $\alpha = 0.0024$, фактор качества материала $Q = 2.7$, $4\pi M = 770$ Гс, $\gamma = 1.81 \cdot 10^7$ Э $^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$, $\Delta = 2 \cdot 10^{-6}$ см. В [2] было установлено, что, вероятно, благодаря малому значению Q в отсутствие постоянного планарного поля H_p динамически стабильным является только χ -состояние ЦМД, в котором стенка домена не содержит ВЛБ. В присутствии не очень сильного планарного поля ($H_p < 370$ Э) динамически стабильны также два состояния с точками Блоха: в одном (S^*) граница ЦМД содержит одну отрицательную ВЛБ и одну ВЛБ с точкой Блоха ($0 < S < 1/2$), в другом состоянии (S^{**}) граница ЦМД содержит две ВЛБ с точкой Блоха на каждой линии ($0 < S < 1$). Все эти три типа доменов имеют одинаковый угол отклонения $\rho = 73^\circ$. ЦМД в данных состояниях и были объектом исследования.

Идентификация состояний проводилась на основании результатов, полученных в [2], по величине смещения домена при приложении тестового импульса продвигающего поля с амплитудой $H_g = 2.5$ Э и с длительностью 0.26 мкс в планарном поле 100 Э. В соответствии с (4) по нарастанию величины смещения домена должны располагаться в последовательности χ , S^{**} , S^* . Градиентное импульсное поле создавалось парой параллельных полосовых проводников, нанесенных на поверхность гранатовой пленки. Ширина каждого проводника 8 мкм, расстояние между их центрами 46 мкм. Постоянное поле смещения 365 Э, радиус ЦМД 0.5 мкм. Величина смещения домена определялась методом высокоскоростной регистрации [4], скорость вычислялась по измеренному смещению и времени движения, равному времени задержки импульса за светки относительно начала импульса продвигающего поля. Величина скорости для каждого значения H_g получалась усреднением результатов десяти измерений смещения ЦМД. При измерениях в присутствии поля H_p это поле прикладывалось перпендикулярно направлению движения домена, чтобы устранить влияние на ВЛБ тангенциальной составляющей действующей на нее гидротропной силы.

Методом трансляции были сняты зависимости $V(H_g)$ скорости ЦМД в состояниях S^{**} , S^* , χ от амплитуды импульсов продвигающего магнитного поля при нескольких значениях постоянного поля в плоскости пленки. Измерения были выполнены в той области значений H_g , где еще отсутствует явление насыщения скорости. Полученные результаты

представлены на рис. 1—3. Как видно, скорость ЦМД в состояниях S^{**} и S^* возрастает с увеличением планарного поля. Экспериментальные данные были аппроксимированы выражением (4), параметр S использовался в качестве подгоночного. Коэрцитивное поле находилось с помощью формул (2)—(4) методом последовательных приближений по измеренным значениям угла отклонения и скорости χ -домена в отсутствие планарного поля. Предполагалось, что величина H_c не зависит от структуры границы домена и от поля H_p . Полученные из данных измерений для ЦМД в состояниях S^{**} и S^* значения параметра S при разных величинах приложенного планарного поля приведены на рис. 4. Мы полагаем, что столь существенные изменения скорости S^{**} и S^* ЦМД и величины S связаны с присутствием точек Блоха на ВЛБ. Передвижение точки по линии должно приводить к изменению S , а из (4) следует, что при этом должна

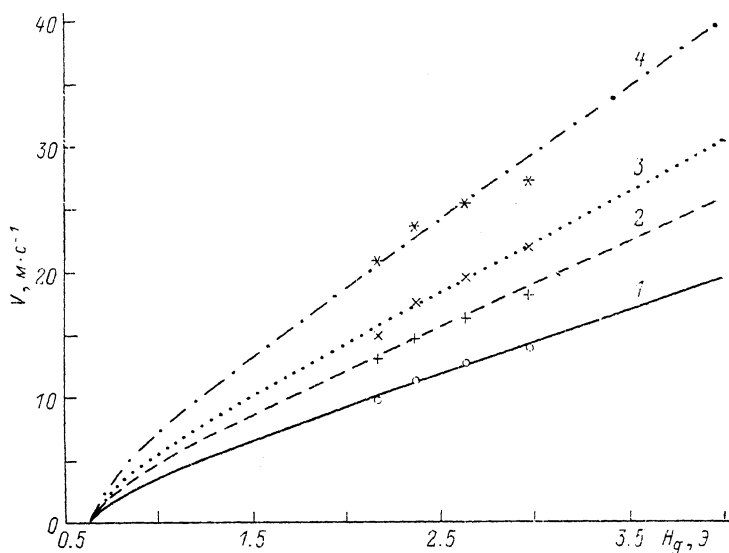


Рис. 1. Зависимость скорости движения ЦМД в S^{**} -состоянии от величины продвигающего поля.

Планарное поле H_p (Э): 1 — 100, 2 — 165, 3 — 235, 4 — 300.

меняться скорость домена. В пользу такого объяснения зависимости скорости S^{**} и S^* -доменов от планарного поля, а также правильности идентификации их состояний свидетельствуют данные, полученные для χ -доменов (рис. 3). Как видно, у ЦМД в этом состоянии при приложении поля H_p скорость не только не увеличивается, но и несколько уменьшается. Это, как указывалось в [2], вероятно, обусловлено образованием в стенке χ -домена под действием поля H_p горизонтальной линии Блоха с углом разворота 2π .

Нетрудно получить формулу, связывающую величину S с положением точек Блоха. Из (1) следует, что параметр S составляет

$$S = \frac{z_1}{h} + \frac{h - z_2}{h},$$

$$S = z_1/h \quad (5)$$

для доменов в состояниях S^{**} и S^* соответственно. Здесь z_1 и z_2 — координаты точек Блоха. При этом разумно предположить, что $z_1 + z_2 = h$. С помощью (5) и зависимости $S(H_p)$ (рис. 4) можно найти координату z_1 точки Блоха при разных значениях приложенного планарного поля (точки на рис. 5).

Полученную таким образом зависимость $z_i(H_p)$ интересно сопоставить с расчетной. Рассчитать положение точки Блоха можно исходя из того [5],

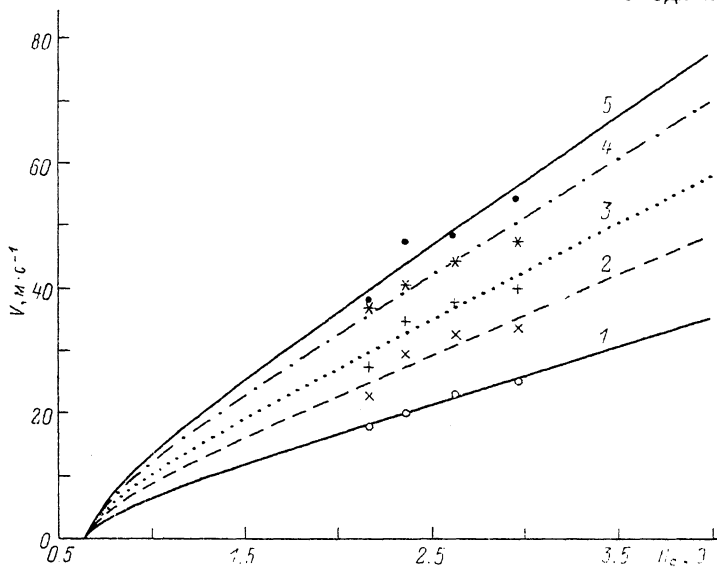


Рис. 2. Зависимость скорости движения ЦМД в S^* -состоянии от величины продвигающего поля.

Планарное поле $H_p(\Theta)$: 1 — 100, 2 — 165, 3 — 235, 4 — 300, 5 — 365.

что в присутствии планарного поля энергия ВЛБ, содержащей точку Блоха, минимальна, если координата z_i точки удовлетворяет соотношению

$$H_p + H_r(z_i) = 0, \quad (6)$$

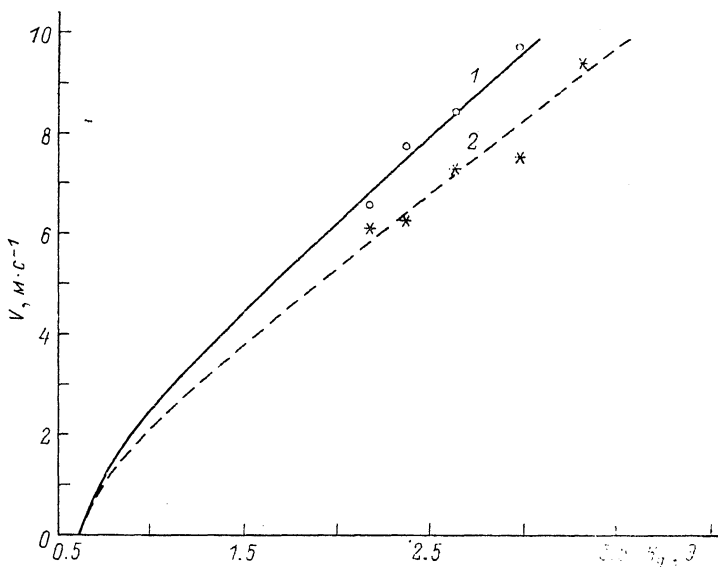


Рис. 3. Зависимость скорости движения ЦМД в z -состоянии от величины продвигающего поля.

Планарное поле $H_p, (\Theta)$: 1 — 0, 2 — 230.

где H_r — нормальная к стенке компонента поля рассеяния, являющегося причиной скручивания спинов в доменной границе. Для случая плоской доменной стенки выражение для поля рассеяния было получено еще в [6],

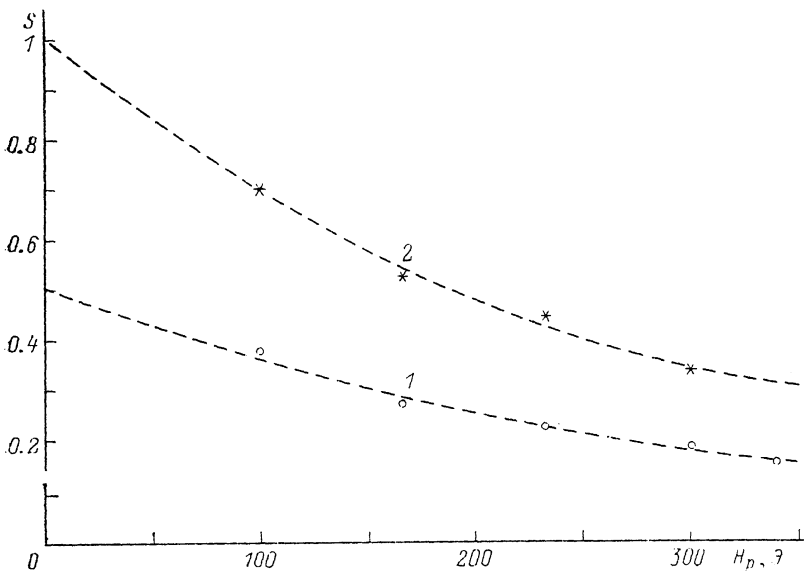


Рис. 4. Зависимость параметра S от величины планарного поля H_p .
Состояния ЦМД: 1 — S^* , 2 — S^{**} .

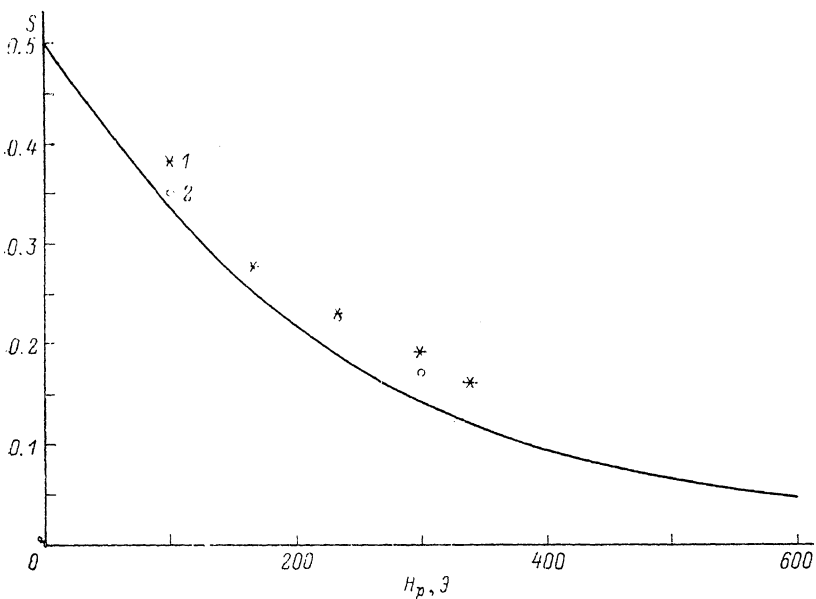


Рис. 5. Зависимость положения точки Блоха от величины планарного поля. Точки на графике получены путем обработки экспериментальных данных для ЦМД в состояниях S^* (1) и S^{**} (2). Сплошная линия получена расчетным путем.

и оно применимо в случае цилиндрической геометрии, если радиус ЦМД $r > 5h$. В рассматриваемой нами ситуации $r < h$, и поэтому распределение поля рассеяния было рассчитано численным методом как производная $(d/dR)P(z, R)$ от потенциала $P(z, R)$ двух равномерно заряженных дисков с плотностью заряда $2M$, находящихся на расстоянии h . Выражение для потенциала имеет следующий вид:

$$P(z, R) = 2M \left[\int_0^{2\pi} \int_0^r \frac{r' d\varphi dr'}{\sqrt{z^2 + R^2 + r'^2 - 2Rr' \cos \varphi}} - \int_0^{2\pi} \int_0^r \frac{r' d\varphi dr'}{\sqrt{(h-z)^2 + R^2 + r'^2 - 2Rr' \cos \varphi}} \right], \quad (7)$$

где координата z отсчитывается от нижней поверхности пленки; R — расстояние от центра домена; полярные координаты r' и φ являются переменными интегрирования. Рассчитанная зависимость $z_i(H_p)$ (рис. 5), как видно, имеет хорошее согласие между значениями $z_i(H_p)$, полученными в результате обработки данных измерений скорости трансляционного движения ЦМД, содержащих ВЛБ с точками Блоха, и расчетной кривой.

В заключение отметим, что результаты настоящей работы свидетельствуют в пользу сделанных ранее в [2] предположений о состояниях ЦМД микронного размера и, таким образом, являются хорошим экспериментальным подтверждением модели стенки ЦМД с ВЛБ и точками Блоха. Показано также, что в пленках с малым параметром диссипации измерения скорости ЦМД дают уникальную возможность определить положения точек Блоха.

Авторы признательны В. В. Лемнову за внимание к работе и поддержку.

Список литературы

- [1] Malozemoff A. P., Slonczewski J. C. *Magnetic domain walls in bubble materials*. New York: Academic Press, 1979. P. 326.
- [2] Боков В. А., Волков В. В., Петриченко Н. Л. // ФТТ. 1991. Т. 33. № 7. С. 2093—2102.
- [3] Beaulieu T. J., Brown B. R., Calhoun B. A., Hsu T., Malozemoff A. P. // *AIP Conf. Proc.* 1976. N 34. P. 138—143.
- [4] Humphrey F. B. // *IEEE Trans. Magn.* 1975. V. 11. N 6. P. 1679—1684.
- [5] Slonczewski J. C. // *AIP Conf. Proc.* 1975. N 24. P. 613—614.
- [6] Slonczewski J. C. // *J. Appl. Phys.* 1973. V. 44. N 4. P. 1759—1770.

Физико-технический институт
им. А. Ф. Иоффе РАН
Санкт-Петербург

Поступило в Редакцию
11 июня 1991 г.