

ПРИПОВЕРХНОСТНЫЕ ТОЧЕЧНЫЕ И ЛИНЕЙНЫЕ МАГНИТНЫЕ СТРУКТУРНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ В СЛАБОУНИЗОТРОПНЫХ МАГНЕТИКАХ

В.Е.Зубов, М.В.Гаджилов, А.Д.Кудаков¹⁾, С.Н.Кузьменко

Московский государственный университет им.М.В.Ломоносова

119899 Москва, Россия

Поступила в редакцию 6 января 1999 г.

После переработки 17 февраля 1999 г.

Экспериментально с помощью магнитооптического микромагнетометра показано, что в нитевидных монокристаллах железа приповерхностные точечные магнитные элементы с отличным от нуля топологическим зарядом смещаются во внешнем магнитном поле вдоль линейных элементов, а элементы с нулевым зарядом остаются при этом неподвижны.

PACS: 75.60.Ch

В слабоанизотропных магнетиках образуется широкий спектр приповерхностных точечных и линейных магнитных структурных элементов. Распределение намагниченности в 180-градусной доменной границе (ДГ) в монокристалле железа и основные элементы ее субструктуры в соответствии с результатами работ [1, 2] представлены на рис.1а. Выход ДГ на поверхность представляет собой линейное магнитное структурное образование типа горизонтальной неелевской линии (ГНЛ). Экспериментально наблюдаемая структура соответствует модели асимметричной блоховской границы Хуберта [3], в которой осуществляется переход от блоховской структуры в объеме кристалла к неелевской в приповерхностной области путем асимметричного загиба ДГ (см. рис.1а). Энергия такой ГНЛ не зависит от направления загиба ДГ на поверхности, поэтому она может делиться на субдомены точечными элементами нескольких типов: приповерхностной блоховской точкой (ПБТ) и двумя типами выхода на поверхность вертикальных блоховских линий (ВБЛ1 и ВБЛ2) (см. рис.1а). Экспериментальное обнаружение точечной особенности типа ВБЛ2 представляет собой более сложную задачу, чем обнаружение ПБТ и ВБЛ1, поскольку при переходе через ВБЛ2 вдоль границы происходит лишь небольшой сдвиг ДГ, а смены знака неелевской компоненты намагниченности не происходит в отличие от ПБТ и ВБЛ1, при переходе через которые неелевская компонента меняет знак. Ниже показано, что эти две группы приповерхностных точечных особенностей (ПБТ и ВБЛ1, с одной стороны, и ВБЛ2, с другой) существенно различаются друг от друга и с точки зрения топологии.

На основании различия знаков неелевской компоненты намагниченности с разных сторон от ПБТ и ВБЛ1 можно сделать вывод о том, что эти структурные элементы должны смещаться вдоль ГНЛ во внешнем магнитном поле, направленном параллельно поверхности кристалла и перпендикулярно ДГ (в поле H_x на рис.1а), а ВБЛ2 в поле H_x смещаться не должна. Экспериментальной проверке этих выводов посвящена настоящая работа.

¹⁾ e-mail: kudakov@adk.phys.msu.su

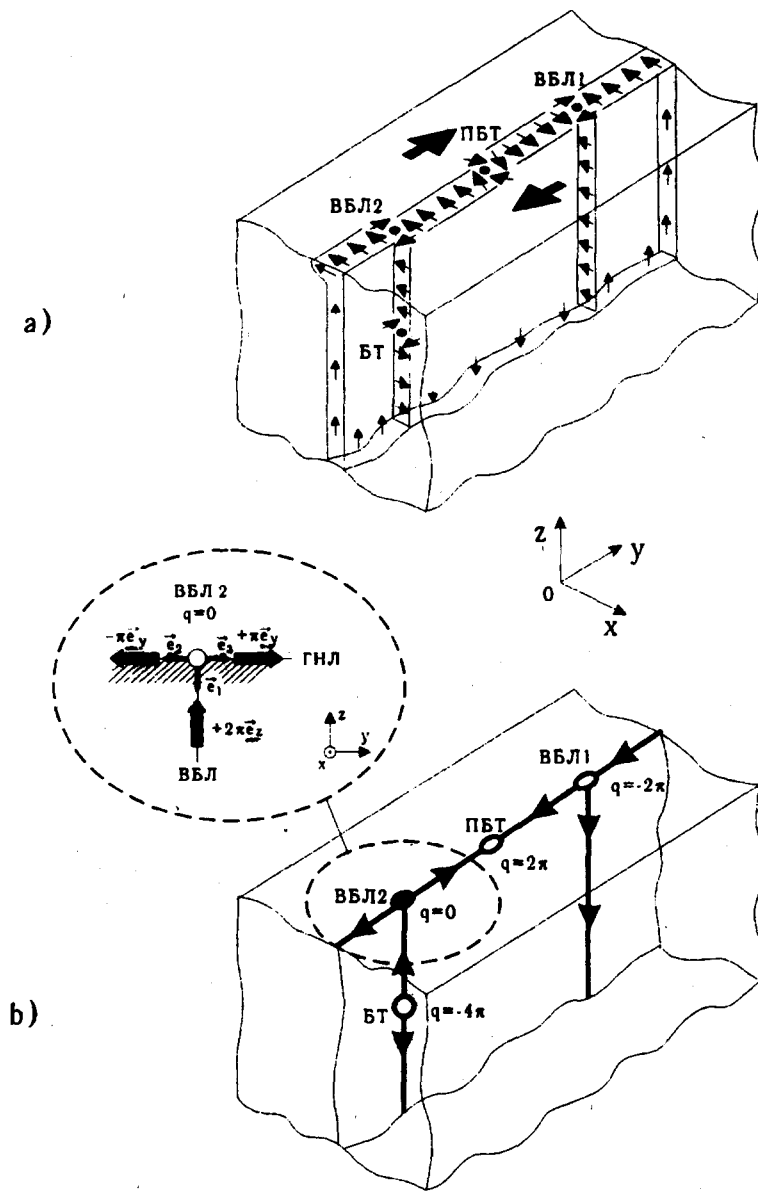


Рис.1. а) Фрагмент 180-градусной доменной границы в железе, содержащий ВБЛ, ГНЛ и точечные структурные особенности – объемную ВТ, ПБТ, ВБЛ1, ВБЛ2; б) распределение потоков гиротропного вектора в микромагнитной структуре, представленной на рис.а

Ниже приведены топологические характеристики линейных и точечных магнитных структурных элементов. Топологический заряд точечного магнитного элемента определяется выражением $q = \int g dS$, где $g = -\sin\theta(\nabla\theta \times \nabla\varphi)$ – гиротропный вектор; θ, φ – угловые координаты вектора намагниченности в сферической системе координат. Интегрирование производится по замкнутой поверхности, окружающей точечный элемент [4, 5]. В силу непрерывности поля вектора намагниченности топологические характеристики точечных элементов и примыкающих к ним линейных элементов должны быть согласованы между собой. Факту деления точечным элементом нескольких линейных (примерами служат ВБЛ1 и ВБЛ2) аналитически

соответствует разделению его топологического заряда вдали от точечной особенности на несколько слагаемых:

$$q = \oint \mathbf{g} d\mathbf{S} = \sum_i \mathbf{e}_i \tau_i. \quad (1)$$

Здесь \mathbf{e}_i – единичные векторы, исходящие из точечного элемента (см. вставку к рис.1b), вектор $\tau_i = \int_{S_i} \mathbf{g} d\mathbf{S}$ определяет поток гиротропного вектора, связанный с линейным элементом, S_i – поверхности интегрирования, представляющие собой плоскости, перпендикулярные к векторам \mathbf{e}_i . Величина τ определяется асимптотическим поведением намагниченности в линейном элементе:

$$\tau = (\cos \theta_1 - \cos \theta_2)(\varphi_2 - \varphi_1), \quad (2)$$

где $\theta_1, \theta_2, \varphi_1, \varphi_2$ – асимптотические значения сферических координат вектора намагниченности вдоль направления их изменения.

Для ГНЛ $\tau = \pm\pi$, для ВБЛ $\tau = \pm 2\pi$. Топологический заряд точечного элемента можно рассчитать, зная τ_i в линейных элементах, исходящих из него. На рис.1b приведено распределение потоков гиротропного вектора τ в микромагнитной структуре, представленной на рис.1a. Для ПБТ топологический заряд $\pm 2\pi$, тогда как для объемной БТ его значение равно $\pm 4\pi$. Топологический заряд ВБЛ1 может принимать значения $\pm 2\pi$, то есть ВБЛ1 топологически эквивалентны ПБТ. Топологический заряд ВБЛ2 равен нулю.

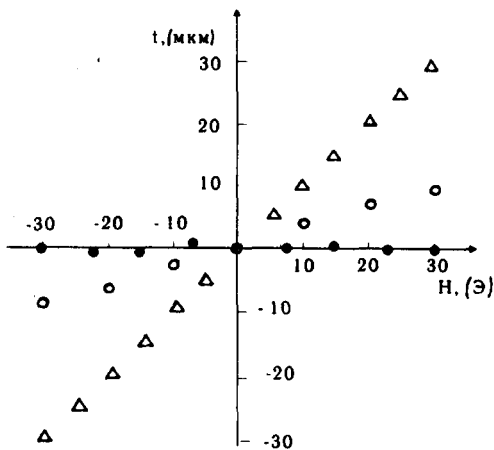


Рис. 2. Смещение (t) ПБТ, ВБЛ1 и ВБЛ2 в постоянном поле H_x из положения равновесия в нитевидном монокристалле железа; Δ – ПБТ, \circ – ВБЛ1, \bullet – ВБЛ2

Перейдем к смещению приповерхностных точечных магнитных структурных элементов во внешнем поле. В качестве образцов использованы нитевидные монокристаллы железа, полученные водородным восстановлением галогенидных солей железа. Для измерений отбирались образцы квадратного сечения со стороной $d = 30 - 150$ мкм, длиной $L \sim 10$ мм с естественными оптически совершенными гранями типа (100). Образцы содержали одну 180-градусную ДГ (см.рис.1a), расположенную в центре вдоль оси кристалла. Магнитное поле H_x , перпендикулярное плоскости ДГ, создавалось с помощью катушек Гельмгольца и изменялось от -30 до $+30$ Э. Для подавления коэрцитивности точечных магнитных структурных элементов и ВБЛ переменным полем H_y частотой ~ 40 кГц возбуждались колебания

ДГ с амплитудой порядка ее ширины. При этом смещение магнитных структурных элементов в постоянном поле H_x и H_z становится полностью обратимым (подробнее см. [2]). Исследования проводились с помощью магнитооптического микромагнетометра, описанного в работе [1]. Измерялся экваториальный эффект Керра, обусловленный неелевской компонентой намагниченности в приповерхностной области ДГ. Методика обнаружения и определения положения точечных особенностей в ДГ подробно описана в работе [1].

Результаты исследований в нитевидном монокристалле железа с $d = 80$ мкм приведены на рис.2. Из рисунка видно, что сдвиг ВБЛ1 (t) из положения равновесия, в котором ВБЛ1 находится в отсутствие поля, линейно зависит от величины поля H_x . Восприимчивость ВБЛ1 составила ~ 0.3 мкм/Э. Максимальный сдвиг ВБЛ1 из положения равновесия в поле $H_x = \pm 30$ Э был равен ± 9 мкм. В пределах точности измерений положение ВБЛ2 при изменении поля H_x в диапазоне $-30 \text{ Э} \leq H_x \leq 30 \text{ Э}$ остается неизменным (см.рис.2). Возможность смещения ПБТ в поле H_x была доказана в работе [2]. В настоящей работе для сравнения была измерена восприимчивость ПБТ в поле H_x в том же образце. Величина восприимчивости ПБТ составила ~ 1 мкм/Э. Более высокая восприимчивость ПБТ по сравнению с ВБЛ1 может быть объяснена тем, что на ВБЛ1 при движении под действием поля H_x действует удерживающая сила со стороны ВБЛ в объеме, поскольку ВБЛ не смещается под действием этого поля.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант # 97-03-32409а) и гранта Минобразования РФ.

-
1. В.Е.Зубов, Г.С.Кринчик, А.Д.Кудаков, Письма в ЖЭТФ **47**, 134 (1988).
 2. В.Е.Зубов, Г.С.Кринчик, С.Н.Кузьменко, ЖЭТФ **99**, 551 (1991).
 3. A.Hubert, Z. Angew. Phys. **32**, 58 (1971).
 4. А.Малоземов, Дж.Слонзуски, *Доменные стенки в материалах с цилиндрическими магнитными доменами*, М.: Мир, 1982 (A.P.Malozemoff and J.C.Slonczewski, *Magnetic domain walls in bubble materials*, Acad.Press. New York, 1979).
 5. А.С.Шварц, *Квантовая теория поля и топология*, М.: Наука, 1989.