УДК 538.13

МАГНИТНАЯ СИММЕТРИЯ ЛИНЕЙНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ДОМЕННОЙ СТРУКТУРЫ В ФЕРРОМАГНЕТИКАХ И ФЕРРИТАХ

В. Г. Барьяхтар, И. А. Леонов, В. Л. Соболев

Изучается геометрия особых линий доменной структуры ферромагнетиков и ферритов — блоховских линий, линий пересечения доменных границ и т. п. Дана симметрийная классификация особых линий, являющихся пересечениями двух и трех стенок, и качественно охарактеризованы распределения локальной намагниченности в окрестности этих линий. В этом анализе учтено требование постоянства нормальной компоненты вектора намагниченности вдоль нормали к стенке.

Хорошо известно [1-3], что доменные структуры (ДС) в ферромагнетиках и ферритах могут иметь весьма сложную геометрию. По причинам, связанным с термодинамикой или кинетикой процесса магнитного упорядочения, доменные границы (ДГ) могут резко изгибаться (изламываться) под различными углами, пересекаться друг с другом и т. п. На характер таких особенностей системы ДГ оказывают влияние величины констант анизотропии, геометрия образца (его форма и ориентация кристаллографических осей относительно поверхности).

ДС часто можно представить как совокупность однородно намагниченных доменов, разделенных одномерными плоскими ДГ. В настоящей работе изучаются особые линии (ОЛ) такой структуры, т. е. линии, вдоль которых «стыкуются» две или более одномерные плоские ДГ. Примерами ОЛ являются: 1) блоховские линии; 2) угловые элементы (линии излома) зигзагообразных ДГ в ферромагнетиках с кубической анизотропией [2]; 3) концевые участки полосовых доменов; 4) линии «стыковки» трех или четырех одномерных участков ДГ.

Геометрия некоторых структур подобного типа изучалась в [4-6] (в работе [4] ОЛ называются линейными магнитными дефектами, так как ядра топологически нетривиальных линейных дефектов распределения намагниченности в ферромагнетиках с ДС рассматриваемого типа могут располагаться лишь вдоль ОЛ; в работах [5, 6] участки ДС, содержащие уединенную ОЛ, называются стеночными кластерами). В [4] рассматривалась также топологическая классификация распределений намагниченности в окрестности ОЛ.

С симметрийной точки зрения из обсуждаемых особенностей изучались только блоховские линии [7]. В настоящей работе мы, следуя методике, данной в [7, 8], проведем симметрийную классификацию уединенных ОЛ в ферромагнетиках и ферритах. Особое внимание будет уделено ДС, формируемым регулярными ДГ, — так мы называем энергетически выгодные границы, положение которых в пространстве обеспечивает возможность постоянства нормальной компоненты намагниченности при переходе от одного из разделяемых данной ДГ доменов к другому; иными словами, нормаль к плоскости регулярной ДГ перпендикулярна разности векторов намагниченности в доменах.[1] Мы ограничимся рассмотрением

[1] Подчеркнем, что мы не ограничиваемся рассмотрением 180°-ных ДГ.

наиболее часто встречающихся конфигураций поля намагниченности, представляющих собой линии «стыковки» двух или трех плоских одномерных ДГ (соответствующие ОЛ называем двух- и трехстеночными). ОЛ с бóльшим числом стенок наблюдаются в реальных образцах [3], однако могут возникнуть только случайно — в специфических конкретных условиях, так как произвольно малой деформацией (сдвигом или поворотом ДГ) такая конфигурация всегда может быть преобразована в совокупность двух- и трехстеночных ОЛ. Последние же устойчивы относительно таких деформаций поля намагниченности.

1. Симметрийный анализ двухстеночных особых линий

Введем декартову систему координат (x, y, z), выбрав начальную точку на данной ОЛ и направив ось z вдоль ОЛ, а ось x — вдоль биссектрисы меньшего из угловых секторов, занимаемых доменами (рис. 1; жирными линиями показаны проекции ДГ на плоскость рисунка; α — угол раствора упомянутого сектора).

1. Рассмотрим сначала случай $0 \leqslant \alpha < \pi$ (значение $\alpha=0$ описывает концевой участок полосового домена). Элементы симметрии ОЛ должны сохранять на месте домены. Такие элементы делятся на две группы: 1) элементы

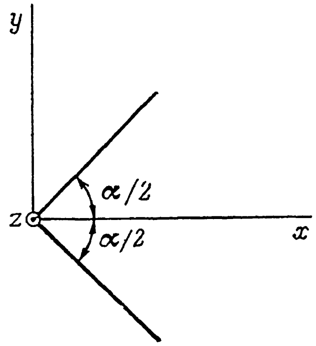

Рис. 1. Выбор системы координат в окрестности двухстеночной особой линии.

$$1,\ 1',\ \bar{2}_z,\ \bar{2}'_z, \tag{1}$$

сохраняющие также плоскости ДГ; 2) элементы

$$2_x,\ 2'_x,\ \bar{2}_y,\ \bar{2}'_y, \tag{2}$$

меняющие местами плоскости ДГ (как и в работах [7, 8]; символ n_c означает поворот на угол $2\pi/n$ вокруг оси $c=x$, y, z; штрих отмечает операцию обращения времени, а горизонтальная черта — применение пространственной инверсии).

Анализ, вполне аналогичный проведенному в [7, 8], позволяет определить все возможные нетривиальные группы симметрии и соответствующие свойства компонент вектора намагниченности. Результаты этого анализа приведены в табл. 1, где символ A_c обозначает нечетность соответствующей функции вдоль оси $c=x$, y, z; S_c — четность; нуль — равенство соответствующей функции нулю; прочерк — отсутствие требований, налагаемых симметрией.

Применение полученной информации к анализу двухстеночных ОЛ, образуемых только регулярными ДГ, дает весьма обозримую классификацию, так как положения стенок в таких ДС тесно связаны с направлениями соответствующих разностей $\Delta \mathbf{M}=\mathbf{M}_1-\mathbf{M}_2$, где $\mathbf{M}_1$, $\mathbf{M}_2$ — векторы намагниченности в доменах, разделяемых данной одномерной ДГ.

Например, в случае группы G_1 вектор $\Delta \mathbf{M}$ направлен вдоль оси x, поэтому для регулярной ОЛ угол α должен обязательно равняться нулю.

В случае группы G_2 вектор $\Delta \mathbf{M}$ перпендикулярен оси x и возможны две ситуации. Если разность $\Delta \mathbf{M}$ не параллельна оси z, то $\alpha=\pi$; если же $\Delta \mathbf{M} \parallel z$, то ограничений на значение угла α нет (мы выше оговорили условие $\alpha < \pi$, но ничто не мешает нам рассматривать и случай $\alpha=\pi$ при условии, что элементы симметрии распределения намагниченности исчерпываются операциями (1), (2)).

Для группы G_3 вектор $\Delta \mathbf{M}$ параллелен оси y, поэтому $\alpha=\pi$.

В случае группы G_4 разность ΔM перпендикулярна оси y и вновь имеем два варианта. Если вектор ΔM параллелен оси z, то ограничений на величину угла α условие регулярности не налагает. В противном случае должно быть $\alpha=0$.

В случае группы G_5 разность ΔM перпендикулярна оси z и возникают три возможности. Если вектор ΔM направлен вдоль оси x, то $\alpha=0$. Если вектор ΔM параллелен оси y, то $\alpha=\pi$. Наконец, если разность ΔM не параллельна ни одной из координатных осей, то не существует никаких значений угла α, при которых ОЛ удовлетворяет условию регулярности (по крайней мере одна из двух стенок обязательно не параллельна разности ΔM).

2. Перейдем теперь к случаю $\alpha=\pi$. Элементами симметрии таких ОЛ, кроме операций (1) и (2), могут быть преобразования $\bar{1}'$, $\bar{2}_x$, 2_y, 2_z, $\bar{2}'_x$, $2'_y$, $2'_z$. Соответствующие группы и свойства симметрии компонент намагниченности приведены в [7]. Нам остается лишь проверить, к чему приводит учет регулярности всех ДГ. Поскольку в рассматриваемой ситуации угол α фиксирован, это требование налагает дополнительные ограничения на величины компонент векторов намагниченности M_1 и M_2 в доменах и на возможные значения угла между этими векторами. Результаты соответствующего анализа приведены в табл. 2; прочерк означает отсутствие ограничений на взаимное расположение векторов M_1, M_2 сверх вытекающих из ограничений на величины компонент намагниченности.

Таблица 1

Симметрия двухстеночных особых линий

Группа симметрии	Симметрия компонент намагниченности во всей конфигурации M_x	M_y	M_z	в доменах M_x	M_y	M_z
$G_1=\{1,\ 2_x\}$	S_y	A_y	A_y	—	0	0
$G_2=\{1,\ 2'_x\}$	A_y	S_y	S_y	0	—	—
$G_3=\{1,\ \bar{2}_y\}$	A_y	S_y	A_y	0	—	0
$G_4=\{1,\ \bar{2}'_y\}$	S_y	A_y	S_y	—	0	—
$G_5=\{1,\ \bar{2}'_z\}$	—	—	0	—	—	0
$G_6=\{1,\ 2_x,\ \bar{2}'_z,\ \bar{2}'_y\}$	S_y	A_y	0	—	0	0
$G_7=\{1,\ 2'_x,\ \bar{2}_y,\ \bar{2}'_z\}$	A_y	S_y	0	0	—	0

Например, симметрия компонент намагниченности для группы, имеющей номер $k=5$, согласно работе [7], такова (функция M_x четна по x, а функция M_y и M_z — нечетны), что, во-первых, разность $\Delta M = M_1 - M_2$ перпендикулярна оси x, а этим автоматически обеспечивается регулярность обеих ДГ, и, во-вторых, очевидно, $M_1 = -M_2$.

В случае группы с номером $k=3$ симметрия компонент вектора M (функция M_y четна по x, а другие компоненты — нечетные по x функции) влечет перпендикулярность разности ΔM оси y. Но среди всех положений вектора ΔM, удовлетворяющих этому ограничению, требованию регулярности ДГ отвечают только направления вдоль оси z, а уже отсюда получаем противоположность направлений векторов M_1 и M_2.

Группы, имеющие, согласно обозначениям работы [7], номера $k=2$, 12, 14, 17, 19, 20, 21, 30, не вошли в табл. 2, так как совокупность всех условий симметрии, накладываемых принадлежностью распределения намагниченности этим группам, вместе с условием регулярности может быть удовлетворена только для нулевых значений вектора M в доменах. Например, симметрия компонент намагниченности в случае $k=2$ такова (функция M_x четна по y, а функции M_y и M_z нечетны), что вектор $\Delta\mathbf{M}$ направлен вдоль оси x, а это несовместимо с условием регулярности.

Табл. 2 показывает, что неставосьмидесятиградусные ДГ могут образовывать обобщенные блоховские линии лишь трех классов симметрии (k=0, 8, 11).

2. Симметрийный анализ трехстеночных особых линий

Симметрийная классификация трехстеночных ОЛ зависит от соотношений между углами α_i (i=1, 2, 3) секторов, занимаемых тремя доменами, «контактирующими» с ОЛ.

Таблица 2

Симметрия обобщенных блоховских линий в регулярных доменных структурах

Номер k группы симметрии, согласно [7]	Элементы симметрии	Ограничения на компоненты векторов $\mathbf{M}_1$, $\mathbf{M}_2$	Угол между векторами $\mathbf{M}_1$ и $\mathbf{M}_2$, град
0	1	$M_{1x}=M_{2x}$	—
1	$1,\ 2_z$	$M_x=M_z=0$	180
3	$1,\ 2_y$	$M_x=M_y=0$	180
4	$1,\ \bar{2}_z$	$M_x=M_y=0$	180
5	$1,\ \bar{2}_x$	$M_x=0$	180
6	$1,\ \bar{2}_y$	$M_x=M_z=0$	180
7	$1,\ 2'_z$	$M_x=M_y=0$	180
8	$1,\ 2'_x$	$M_x=0$	—
9	$1,\ 2'_y$	$M_x=M_z=0$	180
10	$1,\ \bar{1}'$	$M_x=0$	180
11	$1,\ \bar{2}'_z$	$M_z=0,\ M_{1x}=M_{2x}$	—
13	$1,\ \bar{2}'_y$	$M_x=M_y=0$	180
15	$1,\ 2_z,\ \bar{2}_x,\ \bar{2}_y$	$M_x=M_z=0$	180
16	$1,\ \bar{1}',\ 2_z,\ \bar{2}'_z$	$M_x=M_z=0$	180
18	$1,\ \bar{1}',\ 2_y,\ \bar{2}'_y$	$M_x=M_y=0$	180
22	$1,\ 2_z,\ 2'_x,\ 2'_y$	$M_x=M_z=0$	180
23	$1,\ 2_y,\ 2'_z,\ 2'_x$	$M_x=M_y=0$	180
24	$1,\ 2'_z,\ \bar{2}_x,\ \bar{2}'_y$	$M_x=M_y=0$	180
25	$1,\ 2'_x,\ \bar{2}_y,\ \bar{2}'_z$	$M_x=M_z=0$	180
26	$1,\ 2'_y,\ \bar{2}_x,\ \bar{2}'_z$	$M_x=M_z=0$	180
27	$1,\ \bar{1}',\ \bar{2}_z,\ 2'_z$	$M_x=M_y=0$	180
28	$1,\ \bar{1}',\ \bar{2}_x,\ 2'_x$	$M_x=0$	180
29	$1,\ \bar{1}',\ \bar{2}_y,\ 2'_y$	$M_x=M_z=0$	180
31	$1,\ \bar{1}',\ 2_z,\ \bar{2}_x$ $\bar{2}_y,\ 2'_x,\ 2'_y,\ \bar{2}'_z$	$M_x=M_z=0$	180

1. Если все три угла α_i различны, то легко видеть, что элементами симметрии такой конфигурации могут быть только преобразования 1, $\bar{2}_z$, $\bar{2}'_z$, где z — ось, параллельная ОЛ. Из этих элементов можно составить лишь две нетривиальные группы, $\{1,\ \bar{2}_z\}$ и $\{1,\ \bar{2}_z'\}$. Но всякое непрерывное векторное поле, инвариантное относительно операции $\bar{2}_z$, является, очевидно, однородным. Поэтому только вторая из указанных групп может описывать симметрию трехстеночных ОЛ. При этом вектор намагниченности должен быть всюду перпендикулярен оси z. Следовательно, наложение условия регулярности всех ДГ делает невозможной и эту группу.

2. Пусть теперь два угла α_1 и α_2 между ДГ, формирующими трехстеночную ОЛ, равны между собой и не равны третьему углу α_3. Выберем декартову систему координат (x, y, z), направив ось z вдоль ОЛ и ось x

вдоль ДГ, разделяющей конгруэнтные домены (такие ДГ мы будем называть центральными, а остальные — боковыми; рис. 2).

В общем случае возможные группы симметрии таких ОЛ суть группы G_1—G_7 (табл. 1), причем указанные в последних трех столбцах свойства компонент намагниченности имеют место в домене, заключенном между боковыми стенками (его мы будем называть центральным, а два других домена — боковыми). Однако симметрия регулярных полей намагниченности в окрестности трехстеночной ОЛ рассматриваемого типа может описываться только группами G_1—G_3, G_5, G_7, так как группы G_4 и G_6 содержат элемент $2'_y$, что в соединении с условием регулярности приводит к совпадению векторов намагниченности в боковых доменах.

Условие регулярности всех ДГ накладывает, конечно, определенные ограничения на величины углов $\alpha_1=\alpha_2$.

Так, в конфигурациях, имеющих группу симметрии G_1, условие регулярности центральной ДГ приводит к тождеству $M_y \equiv 0$, а регулярность боковых ДГ добавляет требование кратности углов $\alpha_1=\alpha_2$ числу π (другие значения этих углов противоречат условию постоянства модуля вектора **M**).

В случае группы G_2 условие регулярности центральной ДГ автоматически выполнено, а условия регулярности боковых ДГ, как легко показать, эк-

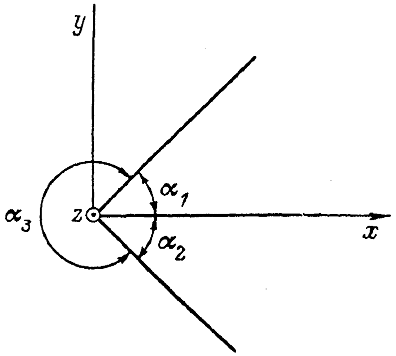

Рис. 2. Выбор системы координат в окрестности трехстеночной особой линии.

вивалентны между собой. Однако следует заметить, что углы $\alpha_1=\alpha_2$ не должны равняться величине $\pi/2$, так как в противном случае условие регулярности боковых ДГ может быть выполнено, только если $M_x \equiv \equiv 0$, а это тождество влечет совпадение значений вектора **M** в боковых доменах.

Аналогично в случае группы G_3 получаем условие $\alpha_1=\alpha_2 \neq 0,\ \pi$.

Принадлежность ОЛ группе симметрии G_5 влечет тождество $M_z \equiv 0$. Поэтому центральная ДГ может быть регулярна лишь при соблюдении равенств $M_{1y}=M_{2y}$, $M_{1x}=-M_{2x}$ (нижний числовой индекс обозначает номер домена, совпадающий с номером i соответствующего угла α_i). Пусть n_x, n_y — координаты вектора нормали ДГ между первым и третьим доменами. Тогда, как легко видеть, условия регулярности боковых ДГ составляют систему равенств

$$n_x(M_{1x}-M_{3x})+n_y(M_{1y}-M_{3y})=0,$$
$$n_x(M_{1x}+M_{3x})+n_y(M_{1y}-M_{3y})=0,$$

откуда $n_xM_{3x}=0$.

Таким образом, боковые ДГ регулярны, либо если $n_x=0$, либо если $M_{3x}=0$. Но выполнение первого из этих условий приводит к тому, что величины намагниченности в центральном домене и одном из боковых совпадают. Поэтому в центральном домене вектор **M** направлен вдоль оси y. На величины углов $\alpha_1=\alpha_2$ имеются ограничения — они не должны быть кратны $\pi/2$ (иначе намагниченность во всех трех доменах одинакова).

Те же ограничения на направления векторов намагниченности в доменах и величину углов $\alpha_1=\alpha_2$ получаем для регулярных ОЛ, имеющих группу симметрии G_7.

3. В случае $\alpha_1=\alpha_2=\alpha_3$ появляются новые возможные элементы симметрии 3_z и 3_z^2 — квадрат элемента 3_z (легко показать, что операции $3'_z$ и $(3_z^2)'$ не могут быть элементами симметрии ненулевого векторного поля). Поэтому в дополнение к группам G_1—G_7 возникает новая серия групп G_n

$(8 \leqslant n \leqslant 14)$, порожденных, по определению, элементами группы G_{n-7} и операцией 3_z

Очевидно, что если симметрия трехстеночной ОЛ описывается одной из групп G_8—G_{14}, то вектор намагниченности в каждом из боковых доменов получается поворотом на $120°$ вокруг оси z в соответствующем направлении вектора намагничености в центральном домене, который должен удовлетворять только ограничениям, указанным в табл. 1. При этом группам G_8, G_{10}, G_{13}, G_{14} отвечает единственный с точностью до обращения времени вариант распределения намагниченности в доменах, который оказывается таким, что в случае групп G_{10} и G_{14} все ДГ регулярны, а в случае групп G_8 и G_{13} все ДГ нерегулярны. Каждая из групп G_9 и G_{11} может описывать симметрию полей намагниченности с бесконечным множеством вариантов направлений вектора **M** в доменах. Но для группы G_9 условие регулярности всегда выполняется, а для группы G_{11} — всегда нарушается. В случае группы G_{12} выполнение условия регулярности зависит, как нетрудно показать, от величины компоненты M_{3x}. Если $M_{3x}=0$, то это условие удовлетворено; если $M_{3x} \neq 0$, то все ДГ нерегулярны.

4. Укажем в заключение на связь между симметрией ОЛ и симметрией ДГ, ее формирующих.

Пусть G — группа симметрии некоторой ОЛ при любом числе примыкающих к ней ДГ. Пусть H — подгруппа группы G, состоящая из элементов, переводящих некоторую из этих стенок в себя. Ясно, что группа симметрии этой ДГ [8] также содержит группу H в качестве подгруппы.

Литература

[1] Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Электродинамика сплошных сред. М., 1982. 620 с.
[2] Хуберт А. Теория доменных стенок в упорядоченных средах. М., 1977. 306 с.
[3] Dillon J. F. Magnetism / Ed. G. T. Rado, H. Suhl. N. Y., London, 1963. V. 3. P. 415—464.
[4] Барьяхтар В. Г., Леонов И. А., Соболев В. Л., Суслин Л. А. // Препринт Ин-та теор. физ. АН УССР, № 86-86Р. Киев, 1986. 33 с.
[5] van den Berg H. A. M., Dane M. F. // J. Magn. Magn. Mat. 1982. V. 27. N 1. P. 71—84.
[6] van den Berg H. A. M. // J. Magn. Magn. Mat. 1982. V. 27. N 1. P. 85—97.
[7] Барьяхтар В. Г., Кротенко Е. Б., Яблонский Д. А. // ЖЭТФ. 1986. Т. 91. № 3. С. 921—933.
[8] Барьяхтар В. Г., Львов В. А., Яблонский Д. А. // ЖЭТФ. 1984. Т. 87. № 5. С. 1863—1876.

Донецкий
физико-технический институт
АН УССР
Донецк

Поступило в Редакцию
22 июля 1988 г.