

ДИССИММЕТРИЯ МАГНИТНЫХ КРИСТАЛЛОВ ПО ОТНОШЕНИЮ К ОПЕРАЦИИ ОБРАЩЕНИЯ ВРЕМЕНИ

А.В. Ковалев

Петербургский институт ядерной физики РАН,
188300 Гатчина, Орлова роща, ПИЯФ, E-mail: kovalev@pnpi.spb.ru

В физике магнитных кристаллов давно известна проблема о допустимой симметрии магнитных фаз G_m (ферромагнетики, ферримагнетики и слабые ферромагнетики), которая возникла в результате формального и неоднозначного использования некоторых понятий. Для определения возможных фаз G_m академик А.В. Шубников использовал один из постулатов П. Кюри, который в кристаллофизике принято называть принципом Неймана, и получил следующий результат [1]: 1, 2, 3, 4, 6, m, 2/m, 4/m, 6/m, $\bar{1}$, $\bar{3}$, $\bar{4}$, $\bar{6}$.

Наличие, по крайней мере, моноклинных и триклинных магнитных кристаллов в настоящее время не вызывает сомнений и является, фактически, доказательством спонтанного нарушения принципа T -инвариантности при магнитных фазовых переходах, что во время написания книги [2] считалось совершенно невозможным. Поэтому авторами был предложен альтернативный вариант решения рассматриваемой задачи, в котором требовалось симметрия кристалла по отношению к операции обращения времени T .

О «малых» нарушениях принципов T -инвариантности и зеркальной симметрии (пространственной четности) достаточно много говорится в современных публикациях. Однако для решения практических задач физики магнитных материалов нечто новое можно получить лишь в предположении «полного» нарушения первого принципа. Такая идея впервые высказана А.С. Компанейцем [3] и коротко выглядит следующим образом. Намагниченность ферромагнетика связана с упорядоченным движением электронов (током). Стало быть, структура кристалла должна каким-то образом задавать направление этого тока, иначе ферромагнетизма быть не может.

В наших работах [4 – 6] идея Компанейца рассматривается в связи с разработкой общей физической модели наведенной анизотропии, классическим примером которой является постоянный магнит. Самый общий результат проще всего получить при использовании следующей формулировки принципа Неймана. Точечная группа магнитного кристалла должна быть подгруппой группы симметрии аксиального вектора \mathbf{N} , коллинеарного вектору спонтанной намагниченности \mathbf{J}_s . При этом условии состояния $\mathbf{N}\uparrow\uparrow\mathbf{J}_s$ и $\mathbf{N}\uparrow\downarrow\mathbf{J}_s$ невозможно совместить поворотами и сдвигами в пространстве и естественно предположить, что лишь одна конфигурация, например $\mathbf{N}\uparrow\uparrow\mathbf{J}_s$, является устойчивым состоянием. После этого легко понять, что все механизмы получения постоянных магнитов как-то связаны с формированием однонаправленной кристаллической текстуры магнитной фазы.

«Полное» нарушение принципа T -инвариантности противоречит традиционным физическим представлениям, в которых причиной нарушения динамических принципов инвариантности считаются слабые взаимодействия в рассматриваемой системе. Поэтому до сих пор существует мнение, что подобные феноменальные явления в отношении принципа зеркальной симметрии наблюдаются лишь для биологических структур. Менее известны работы Шубникова [1] и других авторов [7], в которых обнаружена одна энантиоморфная форма при росте некоторых кристаллов. Для обозначения феномена биоорганического мира используются, в частности, понятия «гомохиральность» и «зеркальная асимметрия». В нашем случае наиболее подходящим кажется понятие «диссимметрия магнитных кристаллов по отношению к операции обращения времени», что соответствует терминологии П. Кюри, который под диссимметрией понимал совокупность всех элементов симметрии, отсутствующую-

щих в системе. Следуя общей концепции Ю. Вигнера о принципах симметрии [8], можно также сказать, что в инвариантной группе магнитных кристаллов нет операции T .

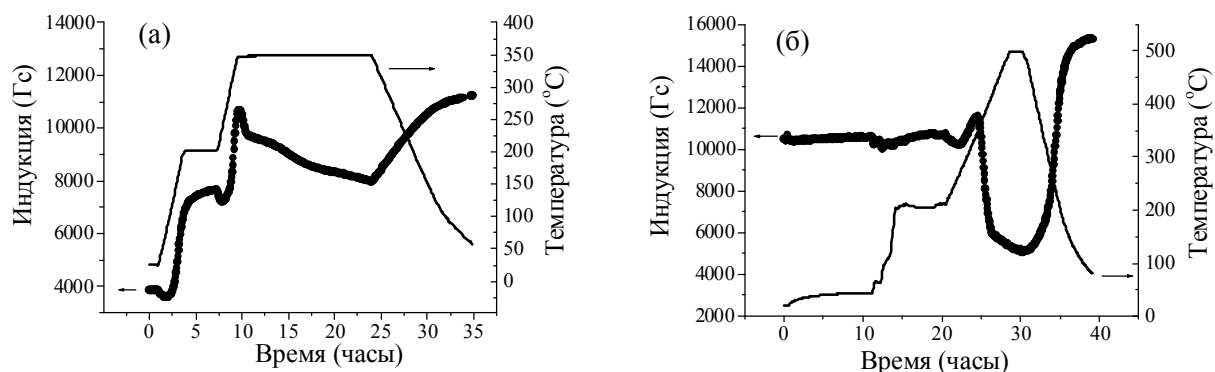
При формулировке экспериментальных задач и трактовке полученных результатов необходимо учитывать весьма абстрактный смысл приведенных выше понятий. Принцип Неймана, в частности, должен выполняться только для идеальных монокристаллов магнитной фазы. На каждый кристаллит в реальном образце действуют локальные магнитные поля и упругие напряжения, что приводит к изменению его симметрии и направления намагниченности. И совсем не очевидно, что величина последней должна быть равной значению спонтанной намагниченности. Для проверки предлагаемых гипотез необходимо установить взаимосвязь магнитных и кристаллических текстур, что оказывается довольно сложной задачей. Кроме того, формирование текстур низкосимметричных магнитных фаз зависит от многих технологических параметров изготовления образцов, что является основной причиной плохой воспроизводимости их физических свойств. Поэтому получение однозначных выводов практически невозможно без оптимального выбора образцов и сопоставления многочисленных результатов измерений.

Новый подход к исследованию природы наведенной магнитной анизотропии был впервые предложен в статье [9], где приведены результаты рентгеновских измерений на пленке состава $\text{Co}_{67}\text{Fe}_{31}\text{V}_2$, полученной методом магнетронного распыления. Далее [10, 11], была определена моноклинная симметрия $2/m$ этого сплава и доказана однозначная взаимосвязь кристаллической текстуры с параметрами гистерезисных кривых. Большая остаточная намагниченность образцов и сильный термомагнитный эффект, который наблюдается без приложения внешнего магнитного поля, позволили использовать разные схемы рассеяния поляризованных нейтронов. Далее приводится краткий обзор последних результатов.

Первая информация о магнитных текстурах наших пленок, толщиной 2 – 3 мкм была получена методом трехмерного векторного анализа поляризованных нейтронов. Измерения выполнялись как на исходных образцах, так и после их отжига при температурах (150 – 200)°С. Экспериментальные данные в большинстве случаев соответствуют однородно намагниченному состоянию. Для исходных состояний наблюдались и большие латеральные домены, но после предварительного приложения магнитного поля вдоль легкой оси, лежащей в плоскости пленки, эти домены исчезали. Были также обнаружены некоторые следствия однонаправленной кристаллической текстуры [12, 13].

Затем были начаты исследования на установке малоуглового рассеяния «Вектор» (реактор ВВР-М, Гатчина). Величины интенсивности и поляризации рассеянных нейтронов измерялись в зависимости от температуры и времени отжига. Полученные результаты, на первый взгляд, кажутся очень сложными и плохо воспроизводимыми, но после их сопоставления обнаружили некоторые общие закономерности. На приводимом рисунке видны, например, сильные количественные отличия наблюдаемого эффекта при $T < 300^\circ\text{C}$, причиной чего являются разные кристаллические текстуры исходных состояний образцов. Направление векторов \mathbf{J}_s и \mathbf{N} для каждого кристаллита пленки коллинеарны двойной оси моноклинной фазы. Локальное магнитное поле задает некое направление намагниченности кристаллита, в результате чего создается его метастабильное состояние. Максимальная величина индукции B образца получится при минимальных значениях углов между векторами \mathbf{N}_i и \mathbf{B} . При некоторой амплитуде тепловых колебаний ионов происходит перестройка кристаллической структуры кристаллита с изменением направлений векторов \mathbf{N}_i . В рамках такой модели можно объяснить рост индукции при первом нагреве пленки до $T < 300^\circ\text{C}$. Возможные варианты трактовки остальных результатов приведены в статьях [14, 15]. К настоящему времени установлено, что при $T > 300^\circ\text{C}$ происходит образование мелкодисперсной фазы, что связано с наличием в сплаве ванадия. Однако вопрос о

магнитной текстуре «однородно» намагниченного состояния остается открытым. Пока можно предположить, что это состояние представляет собой сильную однонаправленную текстуру с разными величинами намагниченностей «доменов». Для проверки этой гипотезы наиболее удобным методом является, по-видимому, рефлектометрия поляризованных нейтронов [16].



Режимы отжига (сплошные линии) и значения индукции для двух образцов, вырезанных из одной заготовки.

В заключение отметим, что общее и однозначное определение существует для операции обращения времени, но не для принципа T -инвариантности. При использовании последнего необходимо рассматривать конкретные физические процессы, происходящие в определенном классе физических объектов. Более того, априорное предположение о выполнении этого принципа недопустимо [8] и создало, в частности, основную проблему физики магнитных кристаллов.

Исследования выполняются при частичной поддержке РФФИ, гранты НШ – 1671.2003.2 и 04.02-16342.

[1] А.В. Шубников. Избранные труды по кристаллографии. Наука, М. (1975). 551 с.
 [2] Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. Электродинамика сплошных сред. Гос. изд-во физ.-мат. лит. М. (1959). С.157-158.
 [3] А.С. Компанец. Симметрия в микро- и макромире. Наука, М. (1978). С. 21-22.
 [4] А.В. Ковалев. Киральная симметрия кристаллической структуры ферромагнетиков. Препринт ПИЯФ-2439. Гатчина (2001). 22 с.
 [5] А.В. Ковалев. Перспективные материалы. № 3, 5 (2004).
 [6] А.В. Ковалев. Диссимметрия магнитных кристаллов и ее следствия. Препринт ПИЯФ-2595. Гатчина (2005). 27 с.
 [7] Э.Д. Рогачева, А.В. Белюстин, Ю.А. Бабушкин, Н.Н. Баженова. Кристаллография **16**, 3, 646 (1971).
 [8] Е.Вигнер. Этюды о симметрии. Мир, М. (1971). 318 с.
 [9] А.В. Ковалев. Письма в ЖТФ. **24**, 19, 51 (1998).
 [10] A.V. Kovalev. Proc. of Moscow Intern. Symp. on Magnet. MSU, M, Part 2, 383 (1999).
 [11] А.В. Ковалев, Г.Е. Шмелев. Поверхность. № 4, 33 (2001).
 [12] А.В. Ковалев. Поверхность. № 8, 106 (2002).
 [13] А.В. Ковалев, Л.А. Аксельрод. Электронный журнал “Исследовано в России”. № 71, 795 (2003). <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2003/071.pdf>
 [15] А.В. Ковалев. Перспективные материалы. № 4, 86 (2004).