

Московский физико-технический институт  
(государственный университет)

Устный экзамен по физике  
(электричество и магнетизм)  
Вопрос по выбору

## **Доменная структура ферромагнетиков**

Талашкевич Даниил Александрович  
Группа Б01-009

Долгопрудный  
2021

# Содержание

<b>1</b>	<b>Ферромагнетизм</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Доменная структура ферромагнетиков</b>	<b>2</b>
2.1	Вступление . . . . .	2
2.2	Образование доменов . . . . .	5
<b>3</b>	<b>Литература</b>	<b>6</b>

# 1 Ферромагнетизм

Ферромагнетиками называют твердые тела, которые могут обладать спонтанной намагниченностью, т.е. намагничены уже в отсутствии магнитного поля. Типичными представителями ферромагнетиков являются металлы: железо, кобальт, никель. Ферромагнетики способны сильно намагничиваться даже в небольших полях.

Характерной особенностью ферромагнетиков является сложная нелинейная зависимость между  $\vec{I}$  и  $\vec{H}$ . По мере возрастания  $\vec{H}$  намагниченность  $\vec{I}$  сначала быстро растет, а затем становится практически постоянной:  $\vec{I} = \vec{I}_s$  (насыщение), т.е. кривая  $I = I(H)$  переходит в горизонтальную прямую. Магнитная индукция  $\vec{B} = \vec{H} + 4\pi \vec{I}$  также растет с возрастанием поля  $\vec{H}$ , а в состоянии насыщения  $\vec{B} = \vec{H} + 4\pi \vec{I}_s$ .

Ввиду нелинейной связи между  $\vec{I} = \chi \vec{H}$  и  $\vec{H}$  для ферромагнетиков магнитная восприимчивость  $\chi$  и магнитная проницаемость  $\mu = 1 + 4\pi\chi$  могут иметь тензорный характер (вектора  $\vec{I}$  и  $\vec{H}$  не сонаправлены). Эти функции рассматриваются как функции напряженности поля  $\vec{H}$ .

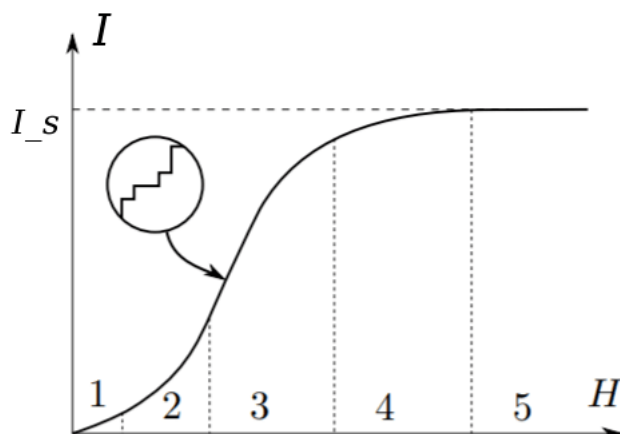


Рис. 1: Начальная кривая намагничивания ферромагнетика

Вторая характерная особенность ферромагнетиков состоит в том, что для них зависимость  $\vec{I}$  от  $\vec{H}$  не однозначна, а определяется предшествующей историей намагничивания ферромагнитного образца. Это явление называется **магнитным гистерезисом**. Благодаря гистерезису намагничивание и перемагничивание ферромагнетиков сопровождается выделением тепла, называемого теплом гистерезиса.

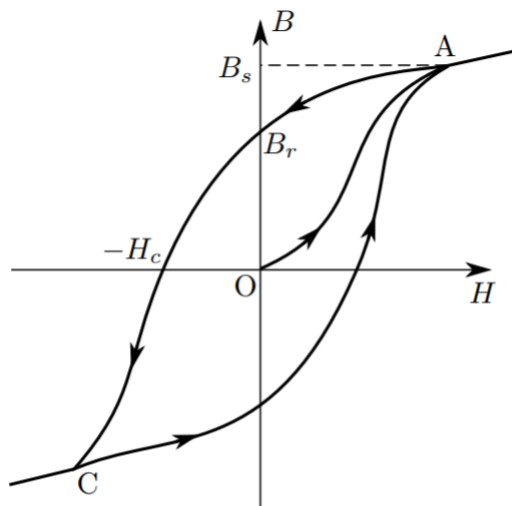


Рис. 2: Начальная кривая намагничивания (ОА) и предельная петля гистерезиса

Третья характерная особенность ферромагнетиков, состоит в том, что для любого ферромагнетика существует определенная температура  $T = T_K$  называемая температурой или точкой Кюри, при переходе через которую вещество ферромагнетика претерпевает фазовый переход второго рода. Вещество является ферромагнетиком только при  $T < T_K$ . При  $T > T_K$  вещество становится парамагнетиком. Магнитная восприимчивость подчиняется закону Кюри-Вейсса

$$\chi = \frac{Const}{T - T_K}$$

## 2 Доменная структура ферромагнетиков

Как и в случае парамагнетиков, атомы ферромагнетика обладают собственным магнитным моментом. Однако даже в отсутствие внешнего магнитного поля атомы ферромагнетика способны образовывать упорядоченные структуры (домены), в которых все магнитные моменты ориентированы практически в одном направлении. Таким образом, каждый отдельный атом испытывает влияние не только внешнего поля, но и поля, созданного коллективом его соседей.

### 2.1 Вступление

Доменом называется область, имеющая только одно направление намагниченности. В ферромагнитном состоянии (при температуре ниже точки Кюри) домены имеют намагниченность насыщения.

Если весь образец намагничен в одну сторону, то возникает сильное магнитное поле, несущее большую энергию. Но это состояние невыгодно: выгодно разбить образец на намагниченные участки (домены). При этом намагниченность разных доменов направлена так, чтобы минимизировать полную магнитную энергию.

**Домены** – макроскопические (хотя и малые) области. Их типичные размеры составляют несколько микрон.

В простейшем случае доменную структуру тонкого образца можно представить, как на рис. 3. Домены с противоположной намагниченностью чередуются. Кроме того, могут появляться так называемые **замыкающие домены** – треугольные домены сверху и снизу образца (рис. 3), передающие магнитный поток от одного домена к другому и уменьшающие магнитное поле вне вещества.

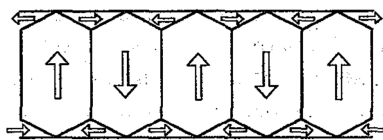


Рис. 3: Чередование доменов с противоположной намагниченностью (стрелки указывают направление намагниченности домена)

Размер домена не может быть произвольным, поскольку в его формировании участвуют несколько конкурирующих факторов:

1. выигрыш в энергии за счёт формирования намагниченности в домене благодаря обменному взаимодействию (**ориентационная энергия**).
2. проигрыш в энергии за счёт возникновения сильных магнитных полей.
3. проигрыш в энергии за счёт формирования доменных стенок границ соседних доменов с противоположно направленными намагниченностями. В этих стенках происходит переход от одной ориентации намагниченности к другой. В результате теряется выигрыш в ориентационной энергии, что приводит к увеличению поверхностной энергии системы.

Процесс перемагничивания для случая доменной структуры на рис. 3 состоит в том, что доменные стенки начинают смещаться, приводя к **поглощению** доменов с "неправильной" намагниченностью и **росту** доменов с "правильной" намагниченностью, как показано на рис. 4. Разумеется, движение стенок не сопровождается макроскопическими движениями вещества – этот процесс состоит только в изменении направления магнитных моментов атомов.

В общем случае ферромагнетик представляет собой набор хаотически ориентированных доменов, в каждом из которых намагниченность имеет определённое направление (рис. 5).

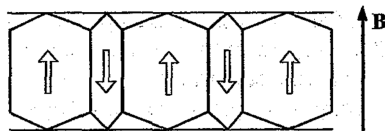


Рис. 4: Перемагничивание ферромагнетика путём движения доменных стенок

Гистерезисный характер перемагничивания связан с наличием необратимых стадий. Дело в том, что при не слишком высоких полях перемагничивание происходит путём смещения доменной стенки. Но это – обратимая стадия. Вместе с тем вследствие наличия дефектов структуры движение доменных стенок может происходить неравномерно, скачкообразно. Такие скачки сопровождаются потерями энергии и приводят к тому, что процесс намагничивания становится необратимым, т.е. к гистерезисным явлениям при перемагничивании.

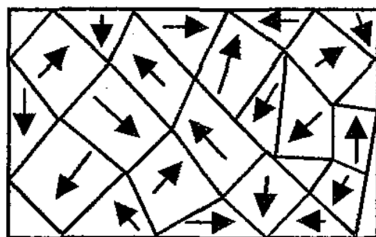


Рис. 5: Доменная структура ферромагнетика – множество доменов со случайным направлением намагниченности

Другой механизм появления необратимости состоит в следующем: в кристаллах существует **ось лёгкого намагничивания**, вдоль которой ориентируется намагниченность. Однако эта ось может не совпадать с направлением внешнего магнитного поля. Такая ситуация обязательно встречается в **поликристаллических образцах** со случайными ориентациями осей в отдельных кристаллах. И тогда в случае достаточно сильных внешних полей начинается "поворот" магнитного момента всего домена к направлению внешнего поля. Эта стадия сопровождается затратами энергии и приводит к гистерезису.

Возможны и другие механизмы, вызывающие потери энергии и гистерезис при перемагничивании. Таковыми являются процессы, когда доменные стенки при своём движении "застевают" на дефектах структуры. В результате возникают скачкообразные движения стенок, сопровождающиеся возникновением индукционных токов и соответствующими потерями энергии.

## 2.2 Образование доменов

Остановимся кратко на причине, по которой соседним магнитным моментам выгодно объединяться в домены. В первую очередь подчеркнём, что **магнитное** (диполь-дипольное) взаимодействие между атомами **не может** привести к упорядочению системы. Чтобы в этом убедиться, достаточно оценить энергию такого взаимодействия: из квантовой механики известно, что магнитный момент атома по порядку величины равен  $m_B = 9,3 \cdot 10^{-24}$  Дж/Тл (магнетон Бора), характерное расстояние между атомами  $a \sim 2 \cdot 10^{-10}$  м, тогда характерное межатомное магнитное поле  $B \sim \mu_0 \frac{m_B}{a^3} \sim 1$  Тл, и характерная энергия диполь-дипольного взаимодействия  $U_{\text{дип.}} \sim m_B B \sim 10^{-4}$  эВ. При такой энергии связи тепловое движение обеспечит полное разупорядочение уже при  $T \sim 1$  К.

Единственное взаимодействие, которое способно выстроить в ряд магнит-

ные моменты электронов в атомах при температурах порядка комнатной, – это **электростатическое взаимодействие** (его энергия на несколько порядков больше магнитной:  $e^2/(4\pi\epsilon_0 a) \sim 1$  эВ). Как следует из квантовой механики, если магнитные моменты (или спины) электронов соседних атомов сонаправлены, их электростатическое отталкивание становится меньше. Таким образом, магнитным моментам атомов энергетически выгодно ориентироваться в одном направлении. Такое явление получило название **обменного взаимодействия**.

С другой стороны, магнитное (диполь-дипольное) взаимодействие между доменами препятствует выстраиванию всех магнитных моментов среды в одном направлении. Действительно, энергия такого взаимодействия будет минимальной при **антипараллельном** расположении магнитных моментов соседних элементов среды. Поэтому при определённом поперечном размере домена оказывается энергетически выгодно иметь соседний домен с противоположно ориентированным моментом (см. рис. 6 слева).

Наложение внешнего поля заставляет домены ориентироваться по нему, что приводит к резкому увеличению намагниченности образца, а при достаточно большом поле достигается состояние **насыщения**, когда все домены ориентируются по полю (см. рис. 6 справа).

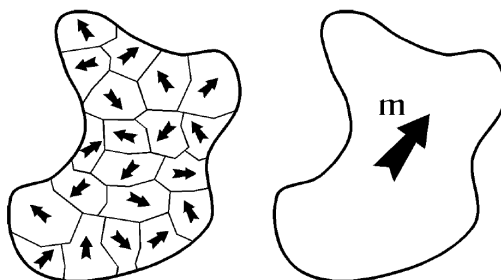


Рис. 6: Доменная структура ферромагнетика при слабом (**слева**) и сильном (**справа**) внешнем поле

### 3 Литература

1. **Лабораторный практикум по общей физике:** Учебное пособие. В трех томах. Т. 2. Электричество и магнетизм /Гладун А.Д., Александров Д.А., Берулёва Н.С. и др.; Под ред. А.Д. Гладуна - М.: МФТИ, 2007. - 280 с.
2. <http://www.amtc.ru/production/metall/Gadoliniy>