

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

Маслов Артём

Симанкович Александр

Б01-104

13.10.2022

Аннотация

В работе исследуются предельные петли гистерезиса и начальные кривые намагниченности для ферромагнитных образцов, определяются магнитные характеристики материалов.

Введение

Из опытов известно, что вещество может реагировать на внешнее магнитное поле. Из-за внутренней структуры парамагнетики («усиливают» действие внешнего магнитного поля) и диамагнетики (стараясь «скомпенсировать» внешнее магнитное поле) довольно слабо реагируют с полем. Ферромагнетики, наоборот, проявляют сильное взаимодействие.

Согласно уравнениям Максвелла, магнитное поле создаётся движущимися зарядами. Магнитное поле также создаётся орбитальным движением электронов вокруг атомов и собственным вращением электронов (спином) и ядер. Полноценное описание магнитных свойств вещества возможно только при применении квантовой механики. В данной работе приводится полуклассическая модель магнитного поля в веществе. Предполагается, что электроны и ядра не обладают собственным вращением.

Теоретическое введение

Магнитное поле в веществе

Магнитное поле на уровне атомов может резко изменяться в пространстве и времени. Такую физическую величину практически невозможно измерить, поэтому рассматриваются физически бесконечно малые объёмы вещества. Такой объём вещества достаточно мал, чтобы его размерами можно было пренебречь, но содержит достаточно большое количество частиц, чтобы магнитное микрополе можно было усреднить.

Для описания усредненного магнитного поля вводится вектор *намагниченности* \mathbf{M} , который равен суммарному магнитному дипольному моменту единицы объёма. Тогда средняя

индукция магнитного поля в данном бесконечно малом объеме равна:

$$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M}),$$

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ – магнитная постоянная.

В простейшем случае намагниченность сонаправлена с вектором напряженности внешнего магнитного поля:

$$\mathbf{M} = \chi \mathbf{H}$$

Коэффициент χ называется магнитной восприимчивостью среды.

Тогда индукция магнитного поля равна:

$$\mathbf{B} = \mu_0(1 + \chi)\mathbf{H} = \mu_0\mu\mathbf{H}$$

Данная модель достаточно груба, по следующим соображениям:

1. \mathbf{M} может быть не сонаправлена с \mathbf{H} .
2. Зависимость $\mathbf{M}(\mathbf{H})$ может быть не линейной.
3. \mathbf{M} может зависеть от предыдущих состояниях вещества — явление гистерезиса.

Тем не менее, данная модель дает правильные по порядку результаты.

Диамагнетики

Наличие внешнего магнитного поля приводит к дополнительному вращению электронов вокруг атомов так, чтобы скомпенсировать внешнее поле. При этом магнитное поле, создаваемое электронами достаточно мало. Такой механизм реакции на внешнее магнитное поле называется диамагнетизмом и он присущ всем веществам. Если диамагнетизм в веществе является основной причиной возникновения намагниченности, то такое вещество называется *диамагнетиком*. Элементарные диполи в диамагнетиках в среднем ориентированы против внешнего магнитного поля, поэтому $\chi < 0$.

Парамагнетики

Если энергия магнитного взаимодействия соседних атомов мала по сравнению с тепловой энергией, то магнитные моменты ориентированы хаотически. Из квантовой механики известно, что во внешнем магнитном поле магнитным моментам энергетически выгодно ориентироваться по направлению внешнего поля. Вещества, в которых элементарные диполи в основном ориентированы по направлению внешнего поля, называются *парамагнетиками*.

Доменная структура ферромагнетиков

В отличие от диа- и парамагнетиков ферромагнетики сильно намагничиваются даже в слабых полях. Как и у парамагнетиков, атомы ферромагнетиков имеют собственный магнитный

момент. Но в отсутствие внешнего магнитного поля магнитные моменты образуют упорядоченные структуры — *домены*, в которых они ориентированы практически в одном направлении.

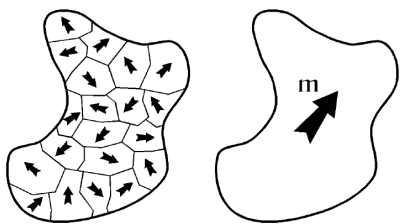


Рис. 1: Доменная структура ферромагнетика в слабом (слева) и сильном (справа) внешнем магнитном поле.

Образование доменов в ферромагнетиках не может быть обусловлено магнитным взаимодействием дипольных моментов соседних атомов, так как энергия такого взаимодействия мала по сравнению с тепловой. Единственными силами, которые могут упорядочить магнитные моменты, являются квантовые электростатические силы взаимодействия электронов. «Энергетически выгодной» оказывается следующая структура ферромагнетика:

1. Соседние магнитные моменты атомов ориентируются в одном направлении, образуя домены, так как энергия электростатического отталкивания электронов в этом случае минимальна. Такое явление называется *обменным взаимодействием*.
2. Домены имеют конечный размер, а соседние ориентированы противоположно. Если рассмотреть ферромагнетик, состоящий из одного большого домена, то окажется, что энергия доменного взаимодействия мала, но в этом случае ферромагнетик создает сильное магнитное поле, которое обладает большой энергией. При дроблении ферромагнетика на домены, энергия магнитного поля уменьшается, а энергия взаимодействия соседних доменов увеличивается. Дробление прекращается, когда сумма энергий магнитного поля и доменного взаимодействия достигает минимума.

Теория ферромагнетизма Вейса

Впервые количественная теория, описывающая ферромагнетизм была разработана французским физиком Вейсом в 1907 году. Согласно этой теории, магнитные моменты соседних атомов взаимодействуют между собой с силами, зависящими от угла между магнитными моментами. Эти силы стремятся ориентировать магнитные моменты в одном направлении, что приводит к образованию доменов. Также предполагается, что эффективное магнитное поле в веществе равно сумме внешнего магнитного поля \mathbf{H} и микрополя $\mathbf{H}_{\text{микро}}$. Микрополе создаётся магнитными моментами соседних атомов и пропорционально намагниченности вещества M .

$$M = \chi H_{\text{эфф}}$$

$$H_{\text{эфф}} = H + \beta M$$

где β - некоторая константа, называемая постоянной Вейса.

Эмпирическая теория Вейса имеет физическое обоснование на основе квантовой механики. Если при рассмотрении закона Кулона в классической механике ввести добавочные силы взаимодействия, то результат получится таким же, как если применять законы квантовой механики. Эти силы называются *обменными* и нужны для согласования классической и квантовой теорий. Они являются короткодействующими и при определенных условиях, связанных

с внутренним строением вещества стремятся установить спины электронов соседних атомов параллельно друг другу, что и объясняет образование доменов в ферромагнетиках. Согласно эксперименту, обменное взаимодействие может быть с достаточной точностью учтено введением некоторого эквивалентного молекулярного поля βM .

Гистерезис

Зависимость намагниченности M ферромагнетика от напряженности внешнего магнитного поля является не линейной.

Рассмотрим начальную кривую намагниченности $M(H)$. Эту кривую разделяют на пять участков:

Область обратимого намагничивания 1. В этой области намагниченность пропорциональна внешнему магнитному полю $M = \chi H$. Домены, которые ориентированы вдоль поля, увеличиваются в размере за счёт переориентировки магнитных моментов соседних атомов. Такой процесс называется упругим смещением границ и является обратимым.

Область Рэлея 2. Зависимость намагниченности от внешнего поля является квадратичной. В этой области смещение границ является обратимым, но зависимость становится квадратичной.

Область наибольшей проницаемостей 3. В этой области происходят необратимые смещения стенок доменов и наблюдается наибольший рост намагниченности. Из-за наличия особенностей структуры вещества (дефекты кристаллической решетки, примеси), существуют силы, которые препятствуют движению границ доменов. Поэтому домену нужно накопить достаточную энергию для преодоления этих сил, то есть движение стенок доменов носит скачкообразный характер (*скачки Баркгаузена*). В следствие скачкообразного изменения границ доменов, скачками меняется и намагниченность.

Область приближения к насыщению 4. Движение стенок доменов в этой области прекращается. Энергетически выгодно становится поворачивать магнитные моменты оставшихся, неориентированных по полю доменов.

Область насыщения 5. В этой области все домены ориентированы по полю, а дальнейшее увеличение внешнего магнитного поля не меняет намагниченность вещества.

При медленном уменьшении напряженности магнитного поля из состояния насыщения, из-за наличия взаимодействия между доменами и особенностей структуры вещества домены, домены будут продолжать ориентированы в одном направлении. Только после достаточного уменьшения внешнего поля, часть доменов изменит свою ориентацию. Из этого видно, что кривая намагниченности не будет совпадать с начальной. Такое явление, когда состояние вещества зависит от истории изменений, называется *гистерезисом*. Рассмотрим предельную петлю гистерезиса.

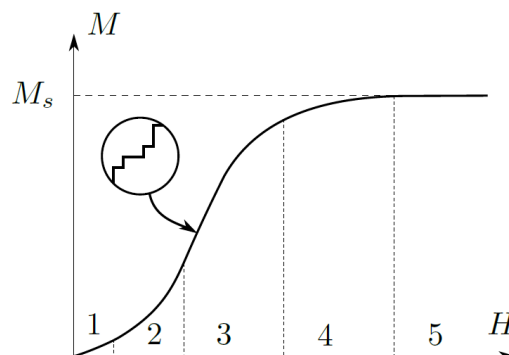


Рис. 2: Начальная кривая намагниченности ферромагнетика.

В точках A и C достигается насыщение, соответствующее значение индукции магнитного поля B_s называется *индукцией насыщения*. Кривая OA является начальной кривой намагничивания. При медленном уменьшении магнитного поля из состояния насыщения, кривая намагниченности проходит выше начальной кривой. При нулевом внешнем магнитном поле, намагниченность ферромагнетика не обращается в ноль, соответствующее этому состоянию значение B_r называется *остаточной индукцией*. Чтобы намагниченность ферромагнетика стала равна нулю, нужно создать магнитное поле H_c , направленное противоположно начальному, которое называется *коэрцитивным*. Цикл $A-C-A$ называется предельной петлей гистерезиса. Площадь цикла в координатах $H-B$ есть энергия, необратимо выделяющаяся в единице объема вещества за один цикл:

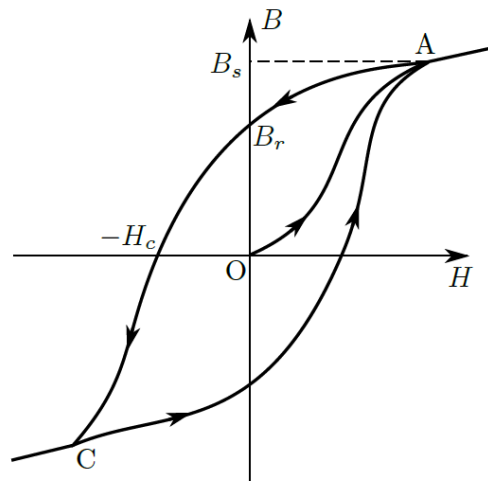


Рис. 3: Начальная кривая намагниченности ферромагнетика.

$$\Delta\omega = \oint_S H dB$$

Оборудование

1. Автотрансформатор.
2. Понижающий трансформатор.
3. Интегрирующая ячейка.
4. Амперметр.
5. Вольтметр.
6. Резистор.
7. Делитель напряжения.
8. Электронный осциллограф.
9. Торoidalные образцы.

Экспериментальные результаты

Выводы