
Ф.Ф. МЕНДЕ
доктор техн. наук
E-mail: fedormende@gmail.com
НИИ Криогенного приборостроения
Физико-технический институт низких температур
им Б.И. Веркина НАН Украины
Харьков, Украина

ПРИНУДИТЕЛЬНАЯ МАКРОСКОПИЧЕСКАЯ КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ МАГНИТНЫХ МОМЕНТОВ В ФЕРРИТОВЫХ КОЛЬЦАХ

Феррит является магнитно-мягким материалом и поэтому не может намагничиваться. Однако, кольца, выполненные из феррита, могут намагничиваться в заданном направлении. Эта особенность намагничивания таких колец не имела до сих пор физического обоснования. В статье рассмотрены процессы намагничивания образцов различной конфигурации, в том числе и кольцевые. Показано, что намагничивание ферритовых колец может рассматриваться как принудительная кристаллизация магнитных моментов.

Ключевые слова: магнитное поле, магнитный момент, ферромагнетик, феррит, магнитный домен.

F.F. MENDE
Doctor of Techn. Sciences
Research institute for cryogenic instrument
engineering B.I. Verkin Institute for Low Temperature
Physics and Engineering NAS Ukraine
Kharkov, Ukraine
E-mail: fedormende@gmail.com

FORCED MACROSCOPIC CRYSTALLIZATION OF MAGNETIC MOMENTS IN FERRITE RINGS

Ferrite is a soft magnetic material and therefore cannot be magnetized. However, rings made of ferrite can be magnetized in a given direction. This feature of the magnetization of such rings has not yet had a physical justification. The article describes the processes of magnetization of samples of various configurations, including ring ones. It is shown that the magnetization of ferrite rings can be considered as forced crystallization of magnetic moments.

Key words: magnetic field, magnetic moment, ferromagnet, ferrite, magnetic domain.

DOI: 10.25791/infizik.04.2019.

1. Введение

Магнитно-мягкие материалы – это материалы, обладающие свойствами ферромагнетика или ферримагнетика, причем их коэрцитивная сила по индукции составляет не более 4 кА/м. Такие материалы также обладают высокой магнитной проницаемостью и малыми потерями на гистерезис. В связи с малостью коэрцитивной силы такие материалы не могут намагничиваться и теряют намагниченность после снятия с них магнитного поля.

Магнитно-мягкие материалы используются в качестве сердечников трансформаторов,

электромагнитов, в измерительных приборах и в других случаях, где необходимо при наименьшей затрате энергии достигнуть наибольшей индукции. Для уменьшения потерь на вихревые токи в трансформаторах используют магнитно-мягкие материалы с повышенным удельным электрическим сопротивлением, обычно применяются в виде магнитопроводов, собранных из отдельных изолированных друг от друга тонких листов. Листы изолируются лаком друг от друга. Такое исполнение сердечника называется шихтованным.

К магнитно-мягким материалам относятся и ферриты, которые обладают высоким удельным сопротивлением, и могут работать на высоких частотах.

Однако из указанного выше правила имеются исключения. Оказывается что кольца, выполненные из магнитно-мягких материалов, могут намагничиваться, сохраняя в себе магнитную индукцию, при которой магнитные силовые линии составляют кольцевые окружности, вложенные в материал кольца. При этом в зависимости от предистории намагничивания направление магнитных силовых линий может быть направлено как в одну, так и в другую сторону.

Идея запоминающего устройства в виде матрицы ферритовых сердечников впервые возникла в 1945 г. у Джона Преспера Экерта. Его отчет широко циркулировал среди американских компьютерных специалистов. В 1949 г. Ван Ань и Во Вайдун – молодые сотрудники Гарвардского университета китайского происхождения – изобрели сдвиговый регистр на магнитных сердечниках (Ван назвал его «устройством, управляющим передачей импульсов» – pulse transfer controlling device) и принцип «запись – считывание – восстановление», который позволил использовать сердечники, у которых процесс считывания разрушает информацию. В октябре 1949 г. Ван подал заявку на патент, и получил его в 1955 г. [1]. К середине 50-х гг. прошлого столетия память на магнитных сердечниках уже получила широкое распространение. Ван подал в суд на IBM, и IBM пришлось выкупить патент у Вана за \$500 000.

Тем временем, Джей Форрестер в Массачусетском технологическом институте работал над компьютерной системой Whirlwind («Вихрь»). В 1949 г., также как и у Вана, у Форрестера возникла идея о памяти на магнитных сердечниках. Согласно утверждениям самого Форрестера, он пришел к этому решению независимо от Вана. В марте 1950 г. Форрестер со своей командой разработал ферритовую память, работающую по принципу совпадения токов; предложенная им схема с четырьмя проводниками – X, Y, считывание, запрет – стала общепринятой. В мае 1951 г. Форрестер подал заявку на патент, и получил его в 1956 г. [2].

2. Самоиндукция и энергия магнитного поля

Самоиндукция является важным частным случаем электромагнитной индукции, когда изменяющийся магнитный поток, вызывающий электродвижущую силу (ЭДС) индукции, создается током

в самом контуре [3]. Если ток в рассматриваемом контуре по каким-то причинам изменяется, то изменяется и магнитное поле этого тока, а, следовательно, и собственный магнитный поток, пронизывающий контур. В контуре возникает ЭДС самоиндукции, которая согласно правилу Ленца препятствует изменению тока в контуре.

Собственный магнитный поток Φ , пронизывающий контур или катушку с током, пропорционален силе тока I :

$$\Phi = LI.$$

Коэффициент пропорциональности L в этой формуле называется коэффициентом самоиндукции или индуктивностью катушки. В качестве примера рассчитаем индуктивность длинного соленоида, имеющего N витков, площадь сечения S и длину l . Магнитное поле соленоида определяется формулой

$$B = \mu_0 nI,$$

где I – ток в соленоиде; $n = N / l$ – число витков на единицу длины соленоида.

Магнитный поток, пронизывающий все N витков соленоида, равен

$$\Phi = BSN = \mu_0 n^2 SI l.$$

Следовательно, индуктивность соленоида равна

$$L = \mu_0 n^2 S l = \mu_0 n^2 V,$$

где $V = S l$ – объем соленоида, в котором сосредоточено магнитное поле. Полученный результат не учитывает краевых эффектов, поэтому он приближенно справедлив только для достаточно длинных соленоидов. Если соленоид заполнен веществом с магнитной проницаемостью μ , то при заданном токе I индукция магнитного поля возрастает по модулю в μ раз, поэтому индуктивность катушки с сердечником также увеличивается в μ раз:

$$L_\mu = \mu L = \mu_0 \mu n^2 V.$$

ЭДС самоиндукции, возникающая в катушке с постоянным значением индуктивности, согласно закону Фарадея равна

$$EMF_{ind} = EMF_L = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

Магнитное поле обладает энергией. Подобно тому, как в заряженном конденсаторе имеется запас электрической энергии, в катушке, по виткам которой протекает ток, имеется запас магнитной энергии.

Из закона сохранения энергии следует, что вся энергия, запасенная в катушке, выделится в виде джоулева тепла. Если обозначить через R полное сопротивление цепи, то за время Δt выделится количество теплоты $\Delta Q = I^2 R \Delta t$.

Ток в цепи равен

$$I = \frac{EMF_L}{R} = -\frac{L \Delta I}{R \Delta t}.$$

Выражение для ΔQ можно записать в виде

$$\Delta Q = -LI\Delta I = -\Phi(I)\Delta I.$$

В этом выражении $\Delta I < 0$, а ток в цепи постепенно убывает от первоначального значения I_0 до нуля. Полное количество теплоты, выделившейся в цепи, можно получить, выполнив операцию интегрирования в пределах от I_0 до 0. Это дает

$$Q = \frac{LI_0^2}{2}.$$

Таким образом, энергия W_M магнитного поля катушки с индуктивностью L , создаваемого током I , равна

$$W_M = \frac{\Phi I}{2} = \frac{LI^2}{2} = \frac{\Phi^2}{2L}.$$

Применим полученное выражение для энергии катушки к длинному соленоиду с магнитным сердечником. Используя приведенные выше формулы для коэффициента самоиндукции L_μ соленоида и для магнитного поля B , создаваемого током I , можно получить:

$$W_M = \frac{\mu_0 \mu n^2 I^2}{2} V = \frac{B^2}{2\mu_0 \mu} V,$$

где V – объем соленоида. Это выражение показывает, что магнитная энергия локализована не в витках катушки, по которым протекает ток, а рассредоточена по всему объему, в котором создано магнитное поле. Физическая величина

$$W_0 = \frac{B^2}{2\mu_0 \mu}$$

равная энергии магнитного поля в единице объема, называется объемной плотностью магнитной энергии.

3. Механическая модель самоиндукции

В предыдущем разделе было показано, что наличие ферромагнитного сердечника в катушке существенно увеличивает ее индуктивность. Но какова физика этого процесса нигде не описано.

До сих пор считалось, что энергия определяется теми магнитными полями, которые связаны с индуктивностью. Опишем механизм, объясняющий этот феномен (рис. 1).

Предположим, что у нас имеется сверхпроводящий контур, в котором заморожен ток I_0 (что эквивалентно магнитному моменту атома в ферромагнетике), расположенный на расстоянии d от проводника, по которому течет ток I . Контур с замороженным током закреплен при помощи пружины к жесткому основанию. Если пропускать ток через проводник, то контур начнет к нему притягиваться, растягивая пружину и, тем самым, запасая в ней энергию. Причем, чем больше будет замороженный ток в контуре, тем сильнее он будет притягиваться к проводу, и тем большая энергия будет накапливаться в пружине. Поэтому при одних и тех же значениях тока в проводнике, энергия, израсходованная для растяжения пружины, будет разная и будет она зависеть, в том числе, и от тока в короткозамкнутом контуре. Рассмотренная система эквивалентна индуктивности с той лишь разницей, что энергия в такой индуктивности будет накапливаться не в магнитном поле, а в пружине. Причем индуктивность в данном случае будет зависеть и от расстояния между контуром и проводником, и от тока, замороженного в контуре. Характерной особенностью рассмотренной системы является и то, что приближение контура с замороженным током к проводу, по которому течет ток, будет приводить к индукции в нем токов, противоположных исходному току. Таким образом, результирующий ток окажется меньше того тока, который имел бы место при отсутствии контура с замороженным током. Такое поведение суммарного тока свидетельствует об увеличении индуктивности провода, по которому течет ток. Если быстро выключить ток в контуре, то контур с замороженным потоком, возвращаясь в прежнее состояние, наведет в проводнике ЭДС. Этот процесс эквивалентен самоиндукции.

Можно представить и другой вид такого взаимодействия (рис. 2). Для этого нужно контур с замороженным током поместить на оси, проходящей,

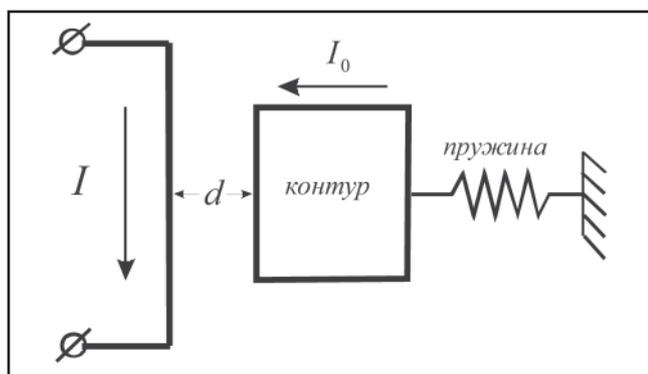


Рис. 1. Контур с замороженным током вблизи проводника, по которому течет ток

через его центр, а к оси прикрепить спиральную пружину, обеспечивающую устойчивое состояние контура в положении, когда один из его боковых проводников находится в непосредственной близости от проводника с током. Тогда при протекании тока I через проводник контур с замороженным током будет поворачиваться в ту или другую сторону, закручивая спиральную пружину, накапливая в ней энергию. Причем направление закручивания пружины будет зависеть от направления тока в проводнике.

До тех пор, пока на ферромагнетик не наложено стороннее внешнее магнитное поле, его атомы или молекулы, обладающие магнитными моментами, которые представляют микроскопические контура, в которых заморожены микроскопические токи, находятся в разупорядоченном состоянии. Такое состояние является для них равновесным.

Возьмем ферритовый стержень и намотаем на него обмотку. Если в обмотку ввести ток, то стержень начнет намагничиваться. Но как только на ферромагнетик накладывается внешнее магнитное поле, в нем начинается происходить ориентация магнитных моментов вдоль поля, на что расходуется энергия, поскольку магнитные моменты, расположенные параллельно, отталкиваются. Если же ток в обмотке быстро выключить, магнитные моменты начнут переходить в исходное разупорядоченное состояние и в обмотке будет наведена ЭДС.

4. Принудительная макроскопическая кристаллизация магнитных моментов в ферритовых кольцах

Как отмечалось в разделе 3, проведенное рассмотрение процессов самоиндукции является

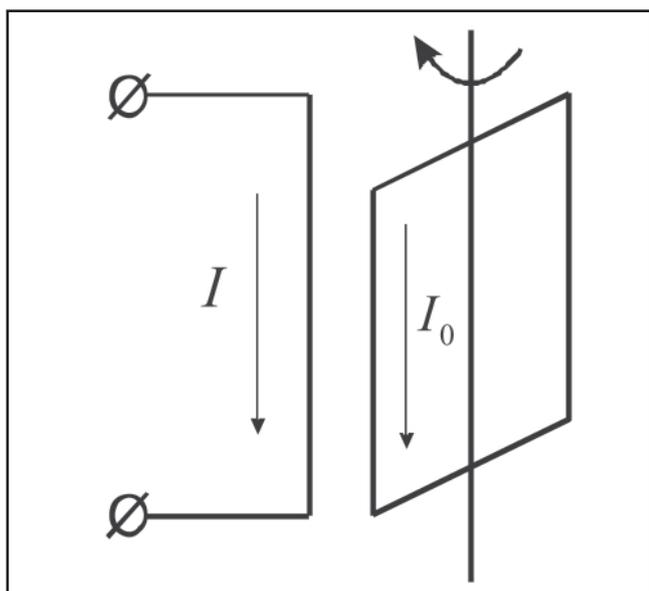


Рис. 2. Вращающийся контур с замороженным током вблизи проводника, по которому течет ток

приближенным, поскольку при таком рассмотрении не были учтены магнитные поля рассеяния, которые присутствуют вокруг намагниченного образца (рис. 3). Эти поля также обладают дополнительной энергией и вносят вклад в общую энергию магнитного поля намагниченного образца. Любая система стремится к минимизации своей свободной энергии и если намагниченный образец свернуть в кольцо и намагнитить его, то поля рассеяния будут отсутствовать. В данном случае такая конфигурация будет соответствовать минимуму свободной энергии. Если же в намагниченном кольцевом образце сделать зазор, расположенный поперек кольца, то там образуются поля рассеяния. Но поскольку при этом на противоположных концах образуются полюса разных знаков, то такие полюса будут притягиваться, стремясь сделать свободную энергию разрезанного кольца минимальной, пытаясь свернуть его в кольцо.

При таком процессе в намагниченном ферритовом кольце магнитные моменты будут расположены в строго определенном порядке, и их вектора будут направлены в одну сторону, как показано на рисунке 4.

У такой структуры будут отсутствовать поля рассеяния, а сама структура будет устойчива, поскольку начало предыдущего вектора магнитного момента притягивается к концу следующего вектора. Этот случай очень похож на линейную

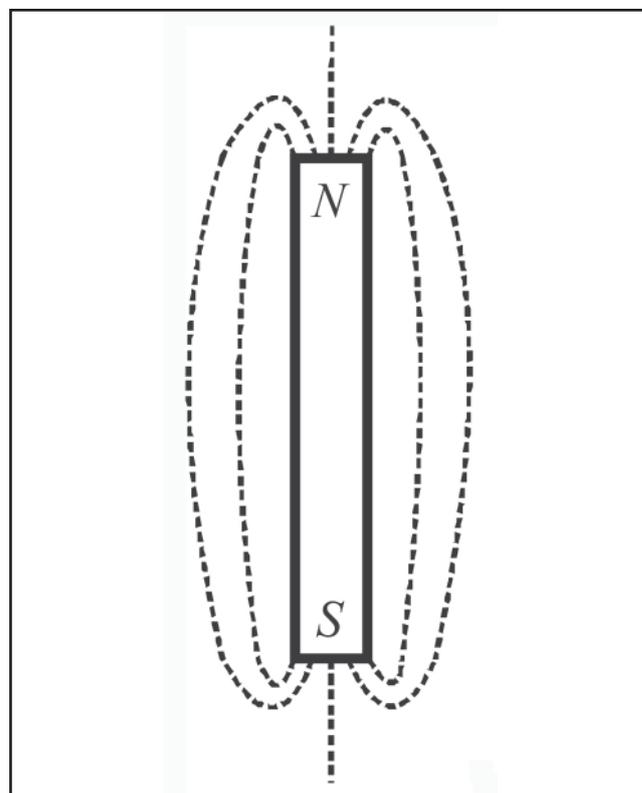


Рис. 3. Поля рассеяния намагниченного образца

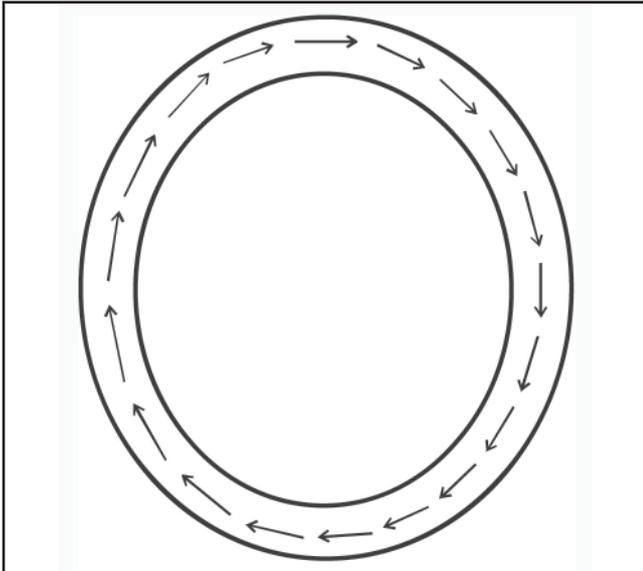


Рис. 4. Структура магнитных моментов в намагниченном ферритовом кольце

кристаллизацию атомов в стержне, согнутом в кольцо, с той лишь разницей, что места атомов занимают магнитные моменты.

Если кольцо перемагнитить, то вектора магнитных моментов поменяют свое направление, но их структура по-прежнему останется стабильной после снятия намагничивающего поля.

Если же кольцо разделить на две части и разнести их, то стремясь к минимуму свободной энергии, при которой поля рассеяния должны отсутствовать, указанные части размагнитятся.

Известно, что в магнитных кристаллах также существуют микроскопические домены, в которых магнитные моменты спонтанно ориентированы в одну сторону. Домены существуют в ферромагнитных, антиферромагнитных, сегнетоэлектрических кристаллах и других веществах, обладающих спонтанным дальним порядком.

В ферритовом кольце магнитные моменты также располагаются в определенном порядке, однако это происходит не спонтанно, как это имеет место в магнитных доменах. Намагничивание ферритового кольца носит целенаправленный принудительный характер, и этот процесс может быть назван принудительной макроскопической кристаллизацией магнитных моментов.

5. Заключение

Феррит является магнитно-мягким материалом и поэтому не может намагничиваться. Однако, кольца, выполненные из феррита, могут намагничиваться в заданном направлении. Эта особенность намагничивания таких колец не имела до сих пор физического обоснования. В статье рассмотрены процессы намагничивания образцов различной конфигурации, в том числе и кольцевые. Показано, что намагничивание ферритовых колец может рассматриваться как принудительная кристаллизация магнитных моментов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ (REFERENCES)

1. An Wang. U.S. Patent 2 708 722: *Pulse transfer controlling devices*.
2. Jay Forrester. U.S. Patent 2 736 880: *Multicoordinate digital information storage device*.
3. Менде Ф.Ф., Дубровин А.С. О физическом механизме формирования электрических полей индукции // *Инженерная физика*. 2017. № 3. С. 41...46 [Mende F.F., Dubrovin A.S. On the physical mechanism of formation of electric induction field. *Engineering Physics*. 2017. № 3. Pp. 41...46] (in Russian).

Сведения об авторе

Менде Федор Федорович, доктор техн. наук, директор

E-mail: fedormende@gmail.com

НИИ Криогенного приборостроения Физико-технический институт низких температур

им. Б.И. Веркина НАН Украины

61103, Украина, Харьков, пр. Ленина, 47

Information about author

Mende Fedor F., Doctor of Techn. Sciences, Director

E-mail: fedormende@gmail.com

Research institute for cryogenic instrument engineering B.I. Verkin Institute for Low Temperature Physics and Engineering

NAS Ukraine

61103, Kharkov, Ukraine, Lenin Ave., 47