

Свойства ферромагнетиков (продолжение).

Если остаточная намагниченность железа мала, то железо называют мягким. Его используют в трансформаторах. Жесткое железо используют для изготовления постоянных магнитов.

Факультативная вставка.

Сильные постоянные магниты получают на основе сплавов NdFeB — неодим-железо-бор — это так называемые неодимовые магниты. Например,

магнит N 45 имеет объемную плотность энергии магнитного поля $\frac{(\vec{B}, \vec{H})}{8\pi} = 45 \cdot 10^6$ (Гаусс*Эрстед). В вакууме индукции 1 Гс соответствует напряженность 1 Э. Для сравнения: магнитное поле Земли на экваторе $B = 0.3$ Гс, на широте 50° $B = 0.5$ Гс. Казалось бы, остаточная магнитная индукция $B = \sqrt{45 \cdot 8\pi} \cdot 10^3$ Гс, однако согласно справочным таблицам она в 2.5 раза меньше этой величины ($B = 13500$ Гс). Вероятно, под объемной плотностью энергии в этом случае подразумевается энергия всего магнитного поля (внутри и вне магнита) отнесенная ко всему объему магнита. В системе СГС Гаусса магнитная индукция измеряется в Гауссах, а в системе СИ — в Теслах: $1 \text{ Гс} = 10^{-4} \text{ Тл}$. Напряженность магнитного поля соответственно в Эрстедах и Ампер/метр, соотношение единиц примерно: $1 \text{ Э} = 80 \text{ А/м}$.

Конец факультативной вставки.

8). Нагревание сердечника при перемагничивании.

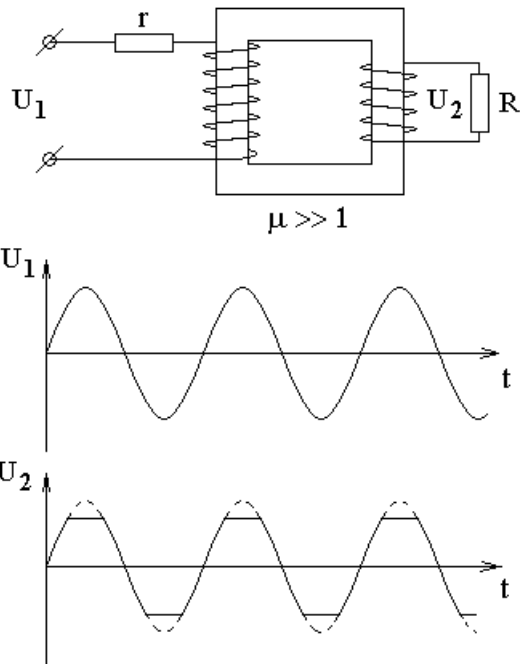
$dw = \frac{1}{4\pi} (\vec{H}, d\vec{B})$ — изменение объемной плотности энергии магнитного поля. С учетом $B \approx 4\pi M$ получаем $dw \approx (\vec{H}, d\vec{M})$.

Изменение энергии в замкнутом цикле перемагничивания $\nu = \frac{1}{4\pi} \oint H dB \approx \oint H dM$ переходит в теплоту сердечника сделанного из ферромагнетика. Теплота, выделяющаяся в единице объема ферромагнетика, равна площади петли гистерезиса $\nu \approx \oint H dM$. В системе СИ: $\nu \approx \oint H dB \approx \mu_0 \oint H dM$.

9). При нормальной работе трансформатора сердечник нельзя вводить в насыщение.

Без насыщения сердечника $\mu \gg 1$. При насыщении $\mu \equiv \frac{dB}{dH} \approx 1$.

Индуктивность первичной обмотки трансформатора $L_{11} \sim \mu$. Следовательно, при насыщении сердечника трансформатора индуктивность первичной обмотки резко уменьшается. При этом возрастает ток холостого хода. При большом токе в первичной обмотке входное напряжение падает на активном сопротивлении первичной обмотки и не трансформируется во вторичную обмотку.



Напряжение во вторичной обмотке насыщается. Обычный трансформатор в таком режиме сильно греется и гудит.

На этом принципе работает феррорезонансный стабилизатор напряжения.

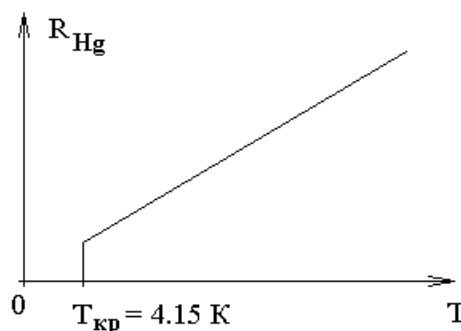
10). Размагничивание.

Многokратное перемагничивание с убывающей амплитудой магнитного поля размагничивает образец.

Свойства сверхпроводников.

1). Фазовый переход.

В 1911 году изучение зависимости сопротивления ртути от температуры привело к открытию сверхпроводимости.



Явление сверхпроводимости состоит в том, что при понижении температуры сопротивление скачком падает до нуля. Эта температура называется критической.

Сверхпроводимость обнаружена не у всех металлов.

Для всех чистых элементов таблицы Менделеева $T_{кр} < 10K$.

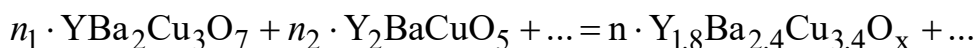
2). Высокотемпературная сверхпроводимость.

77 K = -196°C — температура кипения жидкого азота.

Если критическая температура $T_{кр} > 77K$, то сверхпроводимость называют высокотемпературной.

Охлаждение до температуры кипения жидкого азота относительно недорого. Так 1 литр жидкого азота стоит примерно столько же, сколько стоит разовый проезд в метро.

Высокотемпературная сверхпроводимость получена в материалах, которые представляют собой металлокерамику на основе соединений меди. Обычно под керамикой понимают обожженную глину. Как правило, под глиной понимают минерал, основой которого является каолинит $Al_4[Si_4O_{10}](OH)_8$. На AliExpress можно купить высокотемпературный сверхпроводник на основе металлокерамики с критической температурой $T_{кр} \approx 90K$:



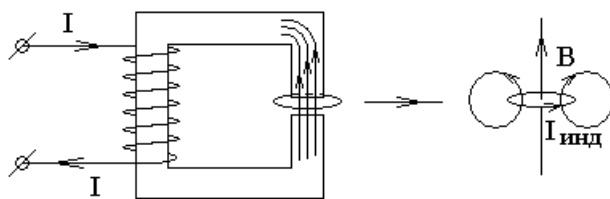
Сверхпроводимость при атмосферном давлении при максимально высокой температуре $T_{кр} \approx 153K$ получена для $HgBa_2Ca_2Cu_3O_{8+\delta}$.

В 2019 году опубликованы результаты наблюдения сверхпроводимости для супергидрида лантана LaH_{10} при $-13^{\circ}C$ при давлении $2 \cdot 10^6$ атмосфер.

В 2020 году получена сверхпроводимость в системе на основе сероводорода H_2S и метана CH_4 . при давлении $2.7 \cdot 10^6$ атмосфер и температуре $+15^{\circ}C$. При высоком давлении сероводород H_2S становится нестабильным и распадается на H_3S и серу S.

3). Сверхпроводящее кольцо с индуцированным током.

Пусть есть кольцо из материала, который при охлаждении становится сверхпроводящим.



Сначала включают ток I в катушке с сердечником. В результате появляется магнитное поле, и его линии принизывают кольцо из материала, который при охлаждении становится сверхпроводящим. Затем охлаждают кольцо и переводят его в сверхпроводящее состояние. После этого кольцо вынимают из зазора сердечника с магнитным полем. В сверхпроводящем кольце при этом возникает ток индукции.

По правилу Ленца ток индукции имеет такое направление, что стремится устранить причину появления тока индукции. Причина появления тока индукции в ЭДС индукции $\mathcal{E}_{инд} = -\frac{1}{c} \frac{d\Phi_B}{dt}$ и изменении потока магнитной индукции Φ_B через кольцо. Направление тока индукции такое, что он стремится сохранить величину потока магнитного поля Φ_B через кольцо.

$$\begin{cases} \mathcal{E}_{инд} = RI_{инд} \\ R = 0 \end{cases}$$

Ток индукции не может быть бесконечно большим, так как он создавал бы бесконечный поток магнитного поля вместо того, чтобы сохранять его величину, как требует правило Ленца.

$$\begin{cases} I_{инд} \neq \infty \\ R = 0 \\ \mathcal{E}_{инд} = RI_{инд} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \mathcal{E}_{инд} = 0 \\ \mathcal{E}_{инд} = -\frac{1}{c} \frac{d\Phi_B}{dt} \end{cases} \Rightarrow \frac{d\Phi_B}{dt} = 0 \Rightarrow \Phi_B = const$$

Когда сверхпроводящее кольцо вынимают из магнитного поля, в нем возникает ток индукции, который поддерживает неизменной величину потока магнитного поля через кольцо.

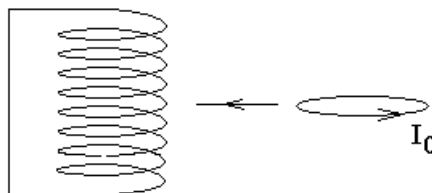
Ток индукции не затухает годами в таком сверхпроводящем кольце. Обнаружить ток индукции можно по наличию магнитного поля рядом со сверхпроводящим кольцом.

4). Задачи со сверхпроводниками.

В любом сверхпроводящем контуре поток магнитного поля сохраняется при любых действиях с контуром. Контур можно деформировать, вставлять его в магнитное поле, вводить в него сердечник. Поток магнитного поля сохраняется.

В качестве примера рассмотрим задачу 3.161 из задачника С. М. Козел, Э. М. Рашба, С. А. Славатинский.

Короткозамкнутая сверхпроводящая катушка с индуктивностью L_c и числом витков N . Сверхпроводящее кольцо того же диаметра с током I_0 и индуктивностью L . Во сколько раз изменится ток в кольце $\frac{I}{I_0} = ?$, если кольцо вдвинуть между витками соленоида.



$$\begin{cases} \frac{I_0}{c} L = \frac{I}{c} L + \frac{I_c}{c} L_c \cdot \frac{1}{N} \\ 0 = \frac{I_c}{c} L_c + \frac{L_c}{N} \cdot \frac{I}{c} \end{cases} \text{ — это два уравнения с двумя неизвестными: } I \text{ —}$$

ток в кольце и I_c — ток в соленоиде после внесения кольца в соленоид.

Поясним уравнения системы. Первое уравнение — это сохранение потока в кольце. В последнем слагаемом первого уравнения $\frac{I_c}{c} L_c$ — поток через катушку за счет тока в катушке, тогда $\frac{I_c}{c} L_c \cdot \frac{1}{N}$ — поток через один виток катушки или через кольцо за счет тока в катушке. Из этого же слагаемого следует, что коэффициент взаимной индукции $L_{12} = \frac{L_c}{N}$. С учетом этого факта получается последнее слагаемое во втором уравнении.

Решаем два уравнения с двумя неизвестными токами I , I_c и находим токи.

5). В сильном магнитном поле сверхпроводимость пропадает.

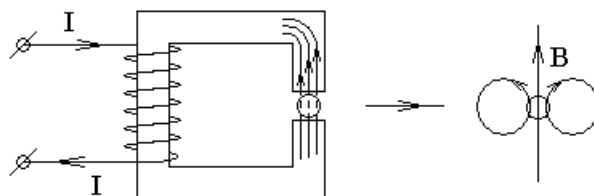
Дело в том, что в магнитном поле снижается критическая температура перехода в сверхпроводящее состояние. В сильном магнитном поле невозможна сверхпроводимость, ни при какой температуре.



По этой причине через сверхпроводник нельзя пропустить слишком большой ток, так как большой ток создает большое магнитное поле, которое разрушает сверхпроводимость.

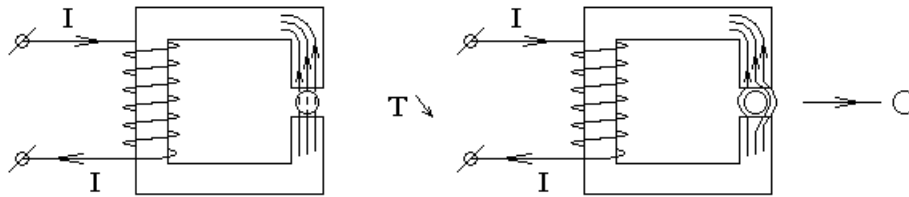
6). Эффект Мейснера.

До 1933 года казалось, что если шар поместить в магнитное поле, охладить ниже критической температуры и вынуть из магнитного поля, то линии магнитного поля внутри сверхпроводника не смогут измениться. Если бы линии изменялись, то нашелся бы контур внутри шара такой, что в нем изменялся бы поток магнитного поля, что в сверхпроводнике невозможно.



Линии магнитного поля, сохранившиеся внутри шара, замыкались бы снаружи шара. Шар превратился бы в постоянный магнит.

Проведенный опыт показал, что изъятый из магнитного поля сверхпроводящий шар не имеет вокруг себя магнитного поля. Оказалось, что при охлаждении образца в магнитном поле, в момент перехода в сверхпроводящее состояние при $T = T_{кр}$ происходит выталкивание магнитного поля из объема сверхпроводника.



Это выталкивание и называют эффектом Мейснера.

7). Поверхностные токи сверхпроводника и экранирование магнитного поля сверхпроводником.

Согласно эффекту Мейснера магнитное поле выталкивается из объема сверхпроводника. В таком случае,

$$\vec{B}_{внутри} = 0 \Rightarrow \text{rot}(\vec{B}_{внутри}) = 0,$$

но $\text{rot}(\vec{B}_{внутри}) = \frac{4\pi}{c} \vec{j}_{внутри}$, тогда

$$\vec{j}_{внутри} = 0$$

— в сверхпроводнике могут быть только поверхностные токи. Токи протекают в слое толщиной примерно (10÷100) нм — лондоновская глубина проникновения (Фриц и Хайнц Лондоны).

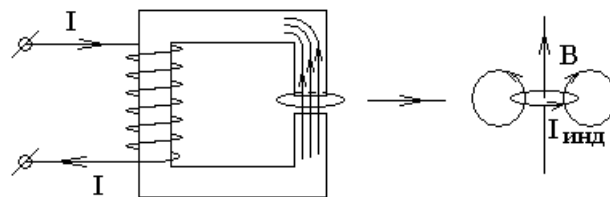
Поверхностные токи создают в каждой точке внутри объема сверхпроводника такое магнитное поле, которое в точности компенсирует внешнее магнитное поле.

В результате сверхпроводник экранирует не только электрическое, но и магнитное поле.

Факультативная вставка. Скин-эффект.

Скин в переводе с английского языка — кожа.

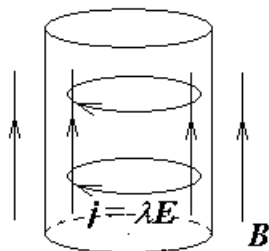
При быстрых изменениях магнитного поля обычный проводник в первый момент ведет себя так же, как сверхпроводник.



Например, рассмотрим кольцо, которое быстро вынимают из магнитного поля. В кольце возникает ток индукции, который по правилу Ленца стремится устранить причину своего появления, то есть сохранить поток магнитного поля через кольцо.

Для обычного проводника ток индукции греет кольцо, на нагревание тратится энергия магнитного поля кольца, и ток индукции затухает. В сверхпроводнике переходной процесс затухания тока индукции растягивается до бесконечности.

Рассмотрим теперь проводящий цилиндр, не сверхпроводящий. В окружающем пространстве быстро включим магнитное поле, направленное вдоль оси цилиндра.



В проводящем цилиндре, как и в сверхпроводящем цилиндре, в первый момент возникают поверхностные токи индукции, которые не пропускают магнитное поле вовнутрь цилиндра.

В проводнике эти токи быстро затухают, пропуская магнитное поле. Магнитное поле проходит в следующий параллельный поверхности слой проводника.

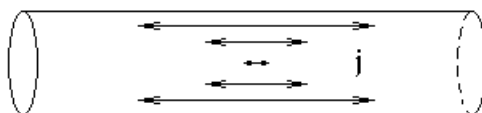
В этом слое снова возникают токи индукции, не пропускающие магнитное поле глубже в проводник. Эти токи тоже затухают и т. д. Магнитное поле проникнет в середину цилиндра за некоторое время.

Если магнитное поле знакопеременное и периодическое, то оно не успевает проникнуть глубоко за половину периода, пока магнитное поле не изменило знак.

В результате глубоко в тело проводника переменное магнитное поле не проникает. Если внутри проводника нет переменного магнитного поля, то нет и переменного электрического поля, так как эти поля связаны друг с другом уравнениями Максвелла.

Следовательно, переменное электромагнитное поле не проникает глубоко в проводник. Электрическое поле связано с токами законом Ома $\vec{j} = \lambda \vec{E}$. Следовательно, переменные токи текут только в поверхностном слое проводника. В этом и состоит скин-эффект.

Для меди при частоте тока $f = 4$ кГц глубина проникновения электромагнитного поля $h = 1$ мм. На этой глубине поле и плотность тока спадают в e раз. На других частотах $h \sim \frac{1}{\sqrt{f}}$.



На рисунке изображено искаженное скин-эффектом распределение плотности тока высокой частоты (ВЧ тока) в длинном цилиндрическом проводнике.

Для ВЧ токов из-за скин-эффекта эффективная площадь сечения проводника уменьшается, а сопротивление проводника соответственно увеличивается.

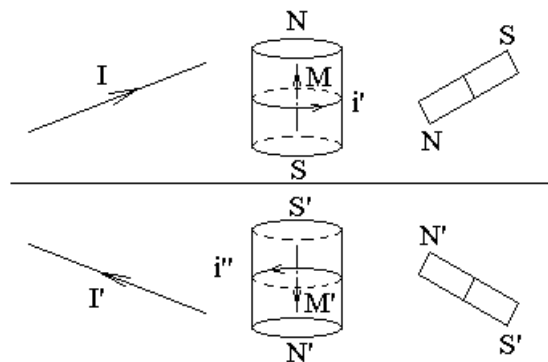
Чтобы устранить влияние скин-эффекта на сопротивление провода, провод для ВЧ токов изготавливают в виде набора тонких изолированных друг от друга проводников. По сравнению с одним толстым проводником того же сечения ВЧ провод имеет большую площадь поверхности и относительно малое сопротивление для ВЧ токов.

Конец факультативной вставки.

8). Метод изображений.

В сверхпроводнике изображаются не только заряды, но и токи. Токи в обычном нейтральном проводнике не изображаются.

Магнитное поле над бесконечной сверхпроводящей плоскостью — поле реальных токов I и зеркально расположенных токов изображений I' .



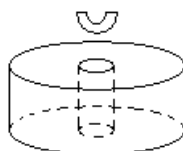
Такой результат согласуется с граничными условиями
$$\begin{cases} B_{2n} - B_{1n} = 0 \\ H_{2\tau} - H_{1\tau} = \frac{4\pi}{c} i' \end{cases}$$

а из единственности решения краевой задачи магнитостатики следует, что решение будет именно таким.

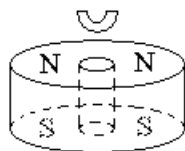
9). "Гроб Магомета".

Токи и магниты всегда отталкиваются от своих изображений в сверхпроводнике. Эта сила позволяет компенсировать силу тяжести и подвесить магнит над сверхпроводником или сверхпроводник над магнитом.

Можно, например, подвесить магнит над сверхпроводящим кольцом:



Можно подвесить кусочек сверхпроводника над магнитом в виде кольца:



Дырка на оси кольца нужна для того, чтобы подвешенный образец не соскальзывал в сторону.

Факультативная вставка.

Аллах призвал к себе Магомета, и тот полетел к Аллаху вместе с камнем, на котором стоял. Заметив непорядок, Магомет сказал камню "останься здесь". С тех пор камень висит над землей, а поскольку аллах призвал Магомета насовсем, камень считают гробом Магомета. Вокруг камня построили мечеть, и теперь — это одна из мусульманских святынь. Такую историю мне рассказал аспирант из Ирака.

Эффект парения сверхпроводника или магнита ассоциируется с этой легендой, и поэтому получил название "гроба Магомета".

В некоторых странах для туристов сделали небольшие участки пути, по которым ходят электропоезда на магнитной подвеске. Там используется не эффект гроба Магомета, а электромагниты со сверхпроводящей обмоткой.

Конец факультативной вставки.

10). Сверхпроводники 2-го рода.

При увеличении внешнего магнитного поля сверхпроводники переходят из сверхпроводящего состояния в состояние с обычной отличной от нуля проводимостью (в сильном магнитном поле сверхпроводимость пропадает). В сверхпроводниках 2-го рода этот переход происходит через некоторое промежуточное состояние (частичный эффект Мейснера), которое отсутствует у сверхпроводников 1-го рода.

Сверхпроводник, состоящий из атомов одного химического элемента, является сверхпроводником 1-го рода. Сплавы разных металлов и металлокерамики являются сверхпроводниками 2-го рода.

В сверхпроводящих сплавах полный эффект Мейснера наблюдается только в слабых магнитных полях. В более сильном магнитном поле в сверхпроводящем сплаве наблюдается частичный эффект Мейснера. В этом случае магнитное поле проникает в объем сверхпроводника в виде узких пучков магнитных линий. Внутри этих пучков магнитных линий вещество переходит из сверхпроводящего состояния в обычное состояние, а между пучками остается в сверхпроводящем состоянии. Вокруг пучков магнитных линий в сверхпроводнике образуются токи (вихри Абрикосова). Если после этого внешнее магнитное поле убрать, то вихри Абрикосова остаются. Такой сверхпроводник создает вокруг себя магнитное поле, подобно постоянному магниту. Вихри Абрикосова поддерживают пучки линий магнитного поля в объеме сверхпроводника. На больших расстояниях внутри сверхпроводника вихри Абрикосова притягиваются друг к другу, а на малых — отталкиваются друг от друга. В результате они образуют структуру с дальним порядком

подобно двумерному кристаллу, где два измерения перпендикулярны пучкам линий магнитного поля.