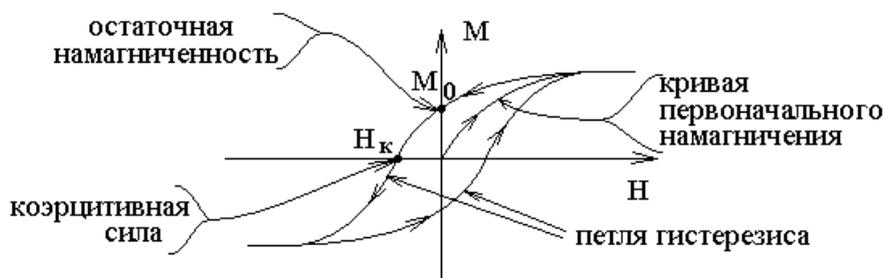


Свойства ферромагнетиков (продолжение).

7). Гистерезис (отставание).

При изменении напряженности в одну, другую сторону, и обратно, зависимость намагниченности от напряженности образует петлю — так называемую петлю гистерезиса. При этом изменение намагниченности M отстает от изменения напряженности магнитного поля H .



Если в начальный момент времени напряженность поля и намагниченность среды были равны нулю, то зависимость $M(H)$ описывает кривую первоначального намагничивания или первоначальной намагниченности.

Если после насыщения намагниченности убрать напряженность магнитного поля, то оставшееся значение намагниченности M_0 называется остаточной намагниченностью (постоянного магнита).

Напряженность магнитного поля H_k , необходимая для устранения остаточной намагниченности M_0 называется коэрцитивной силой.

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

Факультативная вставка.

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: $1 \text{ Э} = 80 \text{ А/м}$.

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 в системе

СГС Гаусса $\frac{(\vec{B}, \vec{H})}{8\pi} = 45 \cdot 10^6 \text{ (Гаусс} \cdot \text{Эрстед)}$. В вакууме в системе СГС Гаусса

индукции 1 Гс соответствует напряженность 1 Э. Для сравнения: магнитное поле Земли на экваторе $B = 0.3 \text{ Гс}$, на широте 50° $B = 0.5 \text{ Гс}$. Казалось бы, остаточная магнитная индукция $B = \sqrt{45 \cdot 8\pi} \cdot 10^3 \text{ Гс}$, однако согласно справочным таблицам она в 2.5 раза меньше этой величины ($B = 13500 \text{ Гс}$). Вероятно, под объемной плотностью энергии в этом случае подразумевается энергия всего магнитного поля (внутри и вне магнита) отнесенная ко всему объему магнита.

Конец факультативной вставки.

8). Нагревание сердечника при перемагничивании.

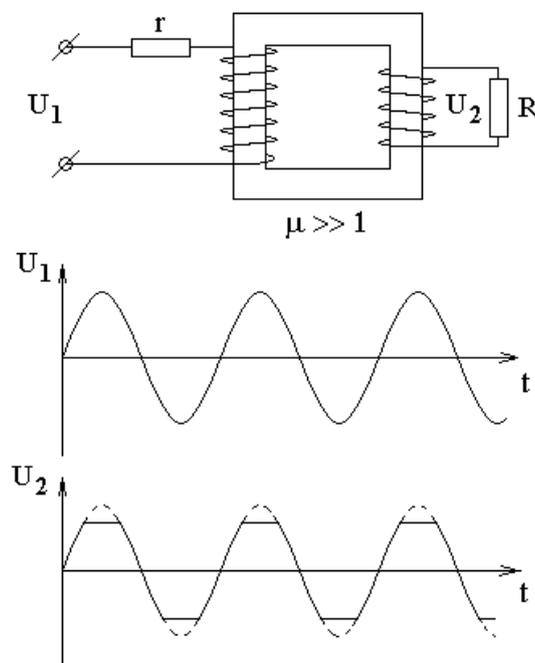
$dw = (\vec{H}, d\vec{B})$ — изменение объемной плотности энергии магнитного поля. С учетом $B \approx \mu_0 M$ получаем $dw \approx \mu_0 (\vec{H}, d\vec{M})$.

Изменение энергии в замкнутом цикле перемагничивания $\nu = \oint HdB \approx \mu_0 \oint HdM$ переходит в теплоту сердечника сделанного из ферромагнетика. Теплота, выделяющаяся в единице объема ферромагнетика, равна площади петли гистерезиса $\nu \approx \oint HdB$.

В системе СГС Гаусса: $\nu \approx \frac{1}{4\pi} \oint HdB \approx \oint HdM$.

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

При линейной зависимости $\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H}$ и $\mu = \frac{B}{\mu_0 H} \gg 1$. При нелинейной зависимости вводится дифференциальная магнитная проницаемость $\mu \equiv \frac{1}{\mu_0} \frac{dB}{dH}$, которая в случае насыщения $\mu \approx 1$. Индуктивность первичной обмотки трансформатора $L_{11} \sim \mu$. Следовательно, при насыщении сердечника трансформатора индуктивность первичной обмотки многократно 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, как это изображено на рисунке. На этом принципе работает феррорезонансный стабилизатор напряжения, а обычный трансформатор с наборным железным сердечником в таком режиме сильно греется и гудит.

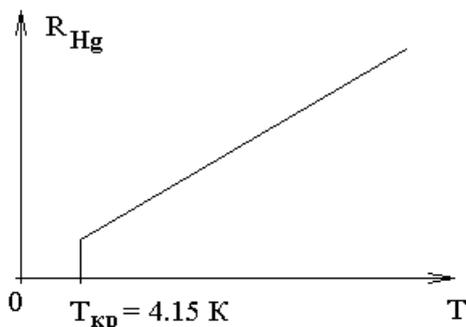
10). Размагничивание.

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 $T_{кр}$.

Сверхпроводимость обнаружена не у всех металлов.

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

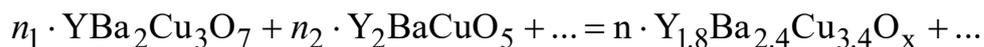
2). Высокотемпературная сверхпроводимость.

$77\text{ K} = -196^{\circ}\text{C}$ — температура кипения жидкого азота.

Если критическая температура $T_{кр} > 77\text{ K}$, 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 $\text{Al}_4[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_8$. На AliExpress можно купить высокотемпературный сверхпроводник на основе металлокерамики с критической температурой $T_{кр} \approx 90\text{ K}$:



Сверхпроводимость при атмосферном давлении при максимально высокой температуре $T_{кр} = 153\text{ K} = -120^{\circ}\text{C}$ получена для $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8+\delta}$.

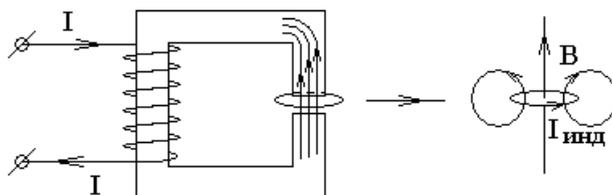
В 2018 году опубликованы результаты наблюдения сверхпроводимости для супергидрида лантана LaH_{10} при -13°C при давлении $2 \cdot 10^6$ атмосфер.

Есть и сомнительные, неподтвержденные результаты высокотемпературной сверхпроводимости. В 2020 году сообщалось о

получении сверхпроводимости в системе на основе сероводорода H_2S и метана CH_4 при давлении $2.7 \cdot 10^6$ атмосфер и температуре $+15^\circ\text{C}$. При высоком давлении сероводород H_2S становится нестабильным и распадается на H_2 и серу S . В июле 2023 года сообщалось о более чем сомнительном результате корейских ученых, о сверхпроводимости при температуре $+127^\circ\text{C}$ (400°K) и нормальном давлении в материале под названием LK-99 с приблизительной формулой $\text{Pb}_9\text{Cu}_1(\text{PO}_4)_6\text{O}$.

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 притягивают 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 $\mathcal{E}_{\text{инд}} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$ 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.

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

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.

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

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

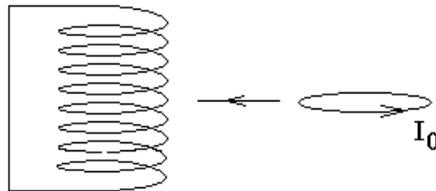
Ток индукции не затухает годами в таком сверхпроводящем кольце. Обнаружить ток индукции можно по наличию магнитного поля рядом со сверхпроводящим кольцом.

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.



$$\begin{cases} LI_0 = LI + L_c I_c \frac{1}{N} \\ 0 = L_c I_c + \frac{L_c}{N} I \end{cases} \quad \text{— это два уравнения с двумя неизвестными: } I \text{ —}$$

новый 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 $L_c I_c$ — поток через катушку за счет тока в катушке, тогда $L_c I_c \frac{1}{N}$ — 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.

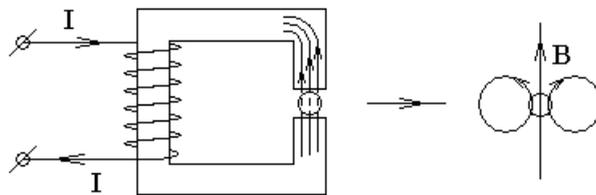
Дело в том, что в магнитном поле снижается критическая температура перехода в сверхпроводящее состояние. В сильном магнитном поле невозможна сверхпроводимость, ни при какой температуре.



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

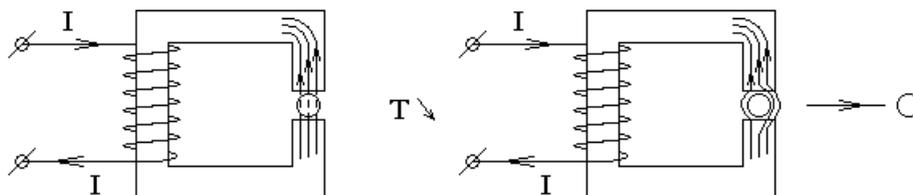
6). Эффект Мейснера.

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,

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

$$\text{но } \text{rot}(\vec{B}_{внутри}) = \mu_0 \vec{j}_{внутри}, \quad \text{тогда}$$

$\vec{j}_{внутри} = 0$ — в сверхпроводнике могут быть только поверхностные токи.

Токи протекают в слое толщиной примерно (10÷100) нм — лондоновская глубина проникновения (Фриц и Хайнц Лондоны).

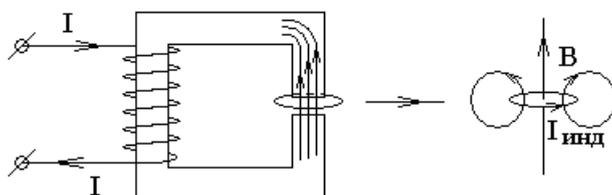
Поверхностные токи создают в каждой точке внутри объема сверхпроводника такое магнитное поле, которое в точности компенсирует внешнее магнитное поле.

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

Факультативная вставка. Скин-эффект.

Скин в переводе с английского языка — кожа.

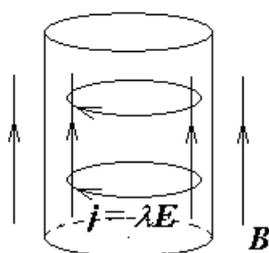
При быстрых изменениях магнитного поля обычный проводник в первый момент ведет себя так же, как сверхпроводник.



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.



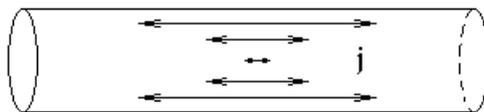
В проводящем цилиндре в первый момент возникают поверхностные токи индукции, как и в сверхпроводящем цилиндре. Эти токи не пропускают магнитное поле вовнутрь цилиндра. В проводнике эти токи быстро затухают, пропуская магнитное поле. Магнитное поле проходит в следующий параллельный поверхности слой проводника. В этом слое снова возникают токи индукции, не пуская 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 поперечного сечения проводника уменьшается, а сопротивление проводника соответственно увеличивается.

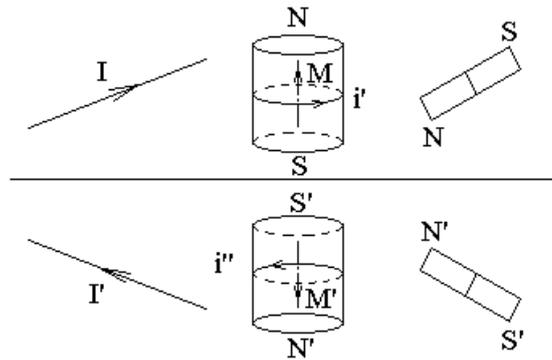
Чтобы устранить влияние скин-эффекта на сопротивление провода, провод для ВЧ токов изготавливают в виде набора тонких изолированных друг от друга проводников. По сравнению с одним толстым проводником того же сечения ВЧ провод имеет большую площадь поверхности и относительно малое сопротивление для ВЧ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



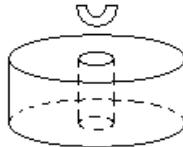
Такой результат согласуется с граничными условиями $\begin{cases} B_{2n} - B_{1n} = 0 \\ H_{2\tau} - H_{1\tau} = i' \end{cases}$, а

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

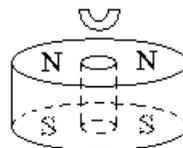
9). "Гроб Магомета".

Токи и магниты всегда отталкиваются от своих изображений в сверхпроводнике. Эта сила для сильного магнита 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 гюбнера Магмета, а электромагниты со сверхпроводящей обмоткой.

Конец факультативной вставки.