

ИЗ ТЕКУЩЕЙ ЛИТЕРАТУРЫ

538.2

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНЫХ ДОМЕНОВ В НЕФЕРРОМАГНИТНЫХ МЕТАЛЛАХ

Образование магнитных доменов в неферромагнитных металлах возможно в условиях сильного эффекта де Гааза—ван Альфена, когда амплитуда осцилляций намагниченности не мала по сравнению с их периодом. При этом существенно то, что намагниченность M однозначно определяется значением индукции B , а не поля H ¹. Если параметр

$$4\pi \left(\frac{\partial M}{\partial B} \right)_{\max} > 1,$$

то на диаграмме состояния $H = H(B)$ возникают области неустойчивости (рис. 1). Неустойчивым состояниям соответствует часть кривой между точками B_1 и B_2 , которая определяется из условия равенства заштрихованных площадей. Устойчивой при заданном H является фаза с наименьшим значением термодинамического потенциала

$$\tilde{\Phi} = -\frac{1}{4\pi} \int_0^H B dH.$$

Состояния с $\frac{\partial H}{\partial B} > 0$ при $B_1 < B < B_2$ могут существовать как метастабильные, а состояния с $\frac{\partial H}{\partial B} < 0$ абсолютно неустойчивы.

Термодинамические потенциалы фаз с индукциями B_1 и B_2 равны, и эти фазы могут сосуществовать.

Магнитное поле H внутри длинного цилиндрического образца, помещенного в продольное внешнее поле H_0 , совпадает с H_0 . Поэтому в таком образце в продольном внешнем поле $H_0 = H_K$ (см. рис. 1) должен произойти фазовый переход I рода — скачкообразное изменение индукции от B_1 до B_2 ².

В случае тонкой пластинки в перпендикулярном к ней внешнем поле H_0 в интервале $B_1 < H_0 < B_2$ термодинамически выгодной является доменная структура, т. е. расслоение на чередующиеся области с индукциями B_1 и B_2 . Концентрации фаз определяются условием сохранения магнитного потока $c_1 B_1 + c_2 B_2 = H_0$. Средняя намагниченность образца в области существования доменной структуры также должна линейно зависеть от внешнего магнитного поля H_0 .

Возможность образования доменов в условиях эффекта де Гааза — ван Альфена предсказана Кондоном³. Его эксперименты косвенно подтвердили существование доменов в бериллии: были обнаружены скачки магнитного момента в цилиндре в продольном внешнем поле, а в случае пластинки в перпендикулярном к ней внешнем поле H_0 наблюдалась линейная зависимость намагниченности от H_0 (рис. 2). Подробная теория доменной структуры в условиях эффекта де Гааза — ван Альфена, включающая теорию поверхностного натяжения на границе раздела фаз и теорию выхода доменов к поверхности, построена в работах^{4,5}.

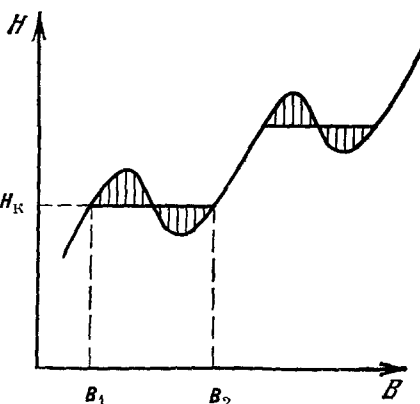


Рис. 1.

В недавней работе Кондона и Вальстедта⁶ было дано прямое доказательство существования магнитных доменов в серебре. Они наблюдали расщепление частоты ядерного магнитного резонанса в серебряной пластинке, связанное с образованием доменной структуры. Эксперименты производились при гелиевых температурах, причем расщепление наблюдалось при $T < 2,5^\circ \text{K}$. Пластика размером $8 \times 8 \times 0,8 \text{ мм}^3$ помещалась в перпендикулярное к ней поле $H_0 \approx 90 \text{ кэ}$, создаваемое сверхпроводящим соленоидом. Плоскость пластинки была перпендикулярна к кристаллографической оси [100].

Используемое в опытах серебро представляло собой смесь изотопов (^{107}Ag и ^{109}Ag) с примерно равными концентрациями. Ядра ^{107}Ag и ^{109}Ag имеют ядерный спин $I = 1/2$ и, следовательно, не обладают квадрупольным моментом. Резонанс

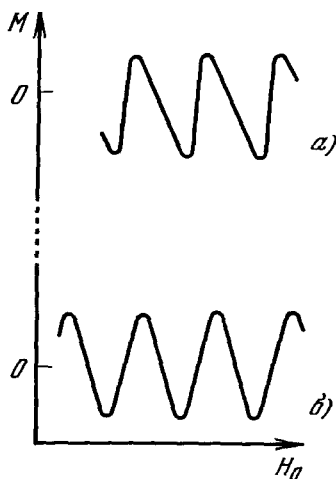


Рис. 2. Зависимость намагниченности бериллия от H_0 при $T = 1,4^\circ \text{K}$ и $H_0 \sim 30 \text{ кэ}$. а) Цилиндрический образец в продольном внешнем поле; б) диск в поперечном поле.

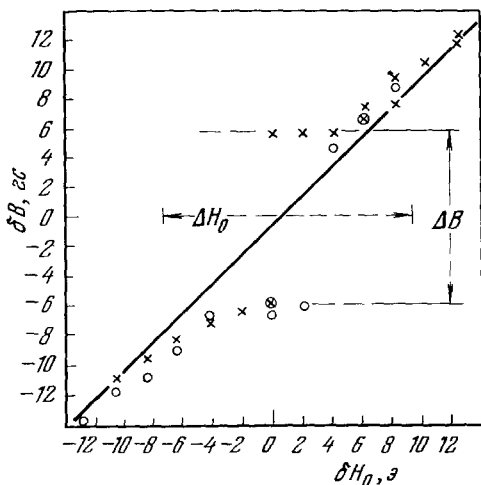


Рис. 3. Зависимость значений магнитной индукции в скин-слое от внешнего магнитного поля H_0 ⁶.

Резонансные частоты ν определялись путем исследования сигнала свободной прецессии спинов ядер ^{109}Ag после действия радиочастотного импульса частоты $\nu_1 = 17913,7$ и $\nu_2 = 17916,7 \text{ кГц}$. Используемое радиоустройство давало возможность измерить разности $\nu - \nu_1$ и $\nu - \nu_2$. Соответствующие экспериментальные точки обозначены кружками и крестиками. Штрихи указывают на то, что при данном значении H_0 имелись две частоты резонанса, однако одну из них нельзя было измерить с достаточной точностью ввиду малости амплитуды сигнала ЯМР. Сплошная линия с наклоном, равным 1, нарисована для сравнения.

наблюдался на ядрах ^{109}Ag , находящихся в скин-слое, на частотах $\nu = \mu B/h \approx 18 \text{ МГц}$, где μ — магнитный момент ядра ^{109}Ag . Ширина резонансной линии была порядка $0,1 \text{ э}$, что значительно меньше, чем наблюдаемое расщепление резонанса. Значения индукции определялись с точностью до $0,5 \text{ гс}$.

Вне области существования доменной структуры ($H_0 < B_1$) индукция B в пластинке равна внешнему полю H_0 и частота резонанса росла линейно с H_0 . Затем в области $B_1 < H_0 < B_2$ наблюдались две частоты резонанса, не зависящие от H_0 и соответствующие значениям индукции B_1 и B_2 . Амплитуды сигналов на этих частотах линейно зависели от H_0 в соответствии с линейной зависимостью от H_0 концентраций фаз. При $H_0 > B_2$ расщепление резонанса исчезало, а затем опять появлялось в новом цикле де Гааз-ван Альфеновских осцилляций. Период осцилляций ΔH_0 был равен $16,7 \text{ гс}$, в то время как $\Delta B = B_2 - B_1 \approx 11 \text{ гс}$. В предположении, что

$$M = M_0 \sin \frac{2\pi (B - H_k)}{\Delta H_0},$$

был вычислен параметр

$$4\pi \left(\frac{\partial M}{\partial B} \right)_{\max},$$

который в этом случае должен быть равным

$$\frac{\pi \Delta B / \Delta H_0}{\sin(\pi \Delta B / \Delta H_0)} \approx 2,6.$$

Результаты экспериментов приведены на рис. 3.

Наблюдаемая картина полностью согласуется с теорией и свидетельствует о том, что глубина скин-слоя велика по сравнению с размерами доменов, иначе искажение доменной структуры вблизи поверхности на глубине порядка ширины доменов размazало бы резонанс. Кроме того, четкое разделение резонансных частот означает, что размеры доменов велики по сравнению с шириной переходной области (доменной стенки), в которой происходит изменение индукции от B_1 до B_2 . Любопытно также то, что наличие расщепления при $T = 2,2^\circ \text{K}$ зависело от того, был ли образец нагрет или охлажден до этой температуры, т. е. наблюдался предсказываемый теорией эффект переохлаждения.

Таким образом, существование доменов в неферромагнитных металлах теперь твердо установлено. Несомненный интерес представляет дальнейшее изучение этого явления и, в частности, обнаружение доменной структуры у других металлов, а также исследование формы доменов в глубине образца и на его поверхности. Надо надеяться, что чрезвычайно красивая и прецизионная работа Кондона и Вальстедта привлечет внимание к этой трудной, но очень любопытной проблеме.

Институт теоретической физики
им. Л. Д. Ландау АН СССР

И. А. Привороцкий

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. D. Shoenberg, Phil. Trans. Roy. Soc. (London) A255, 85 (1962).
2. A. B. Pippard, Proc. Roy. Soc. (London) A272, 192 (1963).
3. J. H. Condon, Phys. Rev. 145, 526 (1966).
4. И. А. Привороцкий, Письма ЖЭТФ 5, 280 (1967); ЖЭТФ 52, 1755 (1967).
5. И. А. Привороцкий, М. Я. Азбель, ЖЭТФ 56, 398 (1969).
6. J. H. Condon, R. E. Walstedt, Phys. Rev. Lett. 21, 612 (1968).