

Действительный член АН БССР Н. С. АКУЛОВ и А. В. ЧЕРЕМУШКИНА

К ТЕОРИИ ЭФФЕКТА ХОЛЛА В ФЕРРОМАГНЕТИКАХ

Как было показано одним из нас ⁽¹⁾, при построении теории нечетных эффектов необходимо исходить из расчета величины эффекта для одной области спонтанного намагничивания. Суммируя эти эффекты, мы получаем затем выражение для зависимости нечетных эффектов от магнитного поля $\mathbf{H}$ и интенсивности намагничивания $\mathbf{I}$ монокристаллов и поликристаллов.

Пусть $\mathbf{i}$ и $\mathbf{i}'$ — плотности первичного и холловского тока, соответственно. Пусть, далее, $\mathbf{A}$ — безразмерный оператор (тензор), преобразующий $\mathbf{i}$ в $\mathbf{i}'$ согласно соотношению

$$\mathbf{i}' = \mathbf{A}\mathbf{i}. \quad (1)$$

Величина $\mathbf{A}$ должна состоять из трех частей: A_1 — характеризующей воздействие внешнего магнитного поля на электроны проводимости (в основном s -электроны); A_2 — характеризующей взаимодействие электронов (в основном d -электронов), обуславливающих результирующий вектор спонтанной намагниченности, с электронами проводимости (в основном s -электроны); A_3 — обуславливающей дополнительный эффект, вызванный изменением величины $\mathbf{I}_s$ за счет внешнего магнитного поля $\mathbf{H}$ (d — H -взаимодействие).

При этом

$$\Delta \mathbf{I}_s = \chi_P \mathbf{H}, \quad \text{где} \quad \chi_P = \frac{\partial I_s}{\partial H}. \quad (2)$$

Из условий симметрии, учитывая физический смысл A_i , имеем

$$A_1 = a_1 H \begin{vmatrix} 0 & h_2 & -h_3 \\ -h_2 & 0 & h_1 \\ h_3 & -h_1 & 0 \end{vmatrix}, \quad A_2 = a_2 I_s \begin{vmatrix} 0 & s_2 & -s_3 \\ -s_2 & 0 & s_1 \\ s_3 & -s_1 & 0 \end{vmatrix},$$

где s_1, s_2, s_3 — компоненты единичного вектора, характеризующего направление спонтанного намагничивания, и, наконец,

$$A_3 = a_3 \chi_P H \begin{vmatrix} 0 & h_2 & -h_3 \\ -h_2 & 0 & h_1 \\ h_3 & -h_1 & 0 \end{vmatrix}. \quad (3)$$

Из (1) и (3) находим:]

$$\mathbf{i}' = a_1 [\mathbf{i} \times \mathbf{H}] + a_1 [\mathbf{i} \times \mathbf{I}_s] + a_3 \chi_P [\mathbf{i} \times \mathbf{H}]. \quad (4)$$

Умножая на объем домена v_i , суммируя по всем доменам и учитывая, что сумма $v_i \cdot \mathbf{I}_s$ дает намагниченность $\mathbf{I}$, имеем:

$$[\mathbf{i}' = a_1 [\mathbf{i} \times \mathbf{H}] + a_2 [\mathbf{i} \times \mathbf{I}] + a_3 \chi_P [\mathbf{i} \times \mathbf{H}]. \quad (5)$$

В случае, когда $\mathbf{I}$ параллельно $\mathbf{H}$, а направление первичного тока $\mathbf{i}$ перпендикулярно $\mathbf{H}$, имеем:

$$i' = a_1 H i + a_2 I i + a_3 \chi_p H i. \quad (6)$$

При $H > H_s$, где H_s — поле насыщения, имеем $I = I_s$. Кроме того, если H и H_s невелики, можем первым и вторым членами пренебречь, т. е.

$$i' = a_2 I i. \quad (7)$$

Переходя от холловского тока i' к холловскому напряжению e , получим

$$e = \rho a_2 I i, \quad (8)$$

где ρ — удельное сопротивление и $e = \rho i'$.

Если исходить из учета $s-d$ -фононного взаимодействия, то можно предположить, что различные виды составляющих полного удельного сопротивления ρ ведут к постоянным Холла различной величины. Вводя в этом случае в рассмотрение сопротивление при абсолютном нуле ρ_0 и температурную часть сопротивления $\rho_T - \rho_0$, в качестве возможного обобщения (8) будем иметь

$$e = [a_0 \rho_0 + a_2 (\rho_T - \rho_0)] I_s i. \quad (9)$$

Цель настоящего исследования заключается в экспериментальной проверке полученных Н. С. Акуловым соотношений (8) и (9). В качестве объекта исследования был взят сплав состава 45% Ni, 55% Fe*. Исследуемый образец имел форму параллелепипеда размерами $6 \times 12 \times 150$ мм.

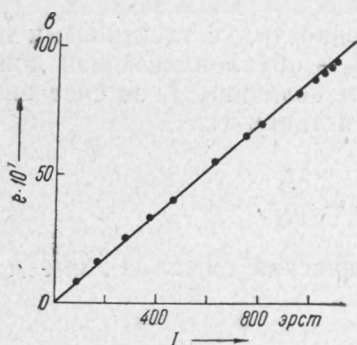


Рис. 1

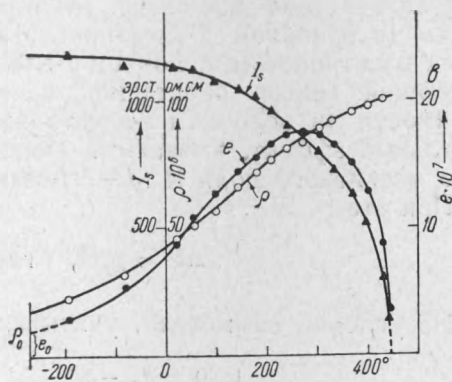


Рис. 2

Для измерения эффекта Холла был принят метод, предложенный Пюхом⁽²⁾ и примененный Кикоиным⁽³⁾ для измерений температурной зависимости электродвижущей силы Холла.

Разность потенциалов Холла измерялась на расстоянии 6 мм, а намагничение осуществлялось соленоидом вдоль образца и измерялось баллистическим методом. Сила первичного тока поддерживалась постоянной порядка 10 а. Для проверки полученной формулы были измерены намагниченность насыщения, удельное электросопротивление и электродвижущая сила Холла для сплава указанного выше состава в интервале температур от температуры жидкого азота до температуры Кюри при внешнем поле $H = 184$ эрст. Омическое сопротивление измерялось на стержнях (диаметр 4 мм) при помощи потенциометра так же, как электродвижущая сила Холла.

* 0,025% C, 0,18% Si, 0,66% Mn, 46% Ni.

Результаты измерений эдс Холла в области технического намагничивания при комнатной температуре даны на рис. 1. Зависимость e от I получилась линейной. Отсюда вытекает, что вплоть до намагниченности насыщения величина эффекта Холла, определяемая по формуле (6), исчезающе мала по сравнению с основным ферромагнитным эффектом, определяемым спонтанной намагниченностью. Прямолинейная зависимость говорит также о том, что роль эффекта Холла за счет пара-процесса в области данных полей также мала. Результаты измерения эдс Холла e , удельного электросопротивления ρ и намагниченности насыщения I_s в зависимости от температуры даны на рис. 2. Намагничивающее поле H было равно 184 эрст. Таким образом, практически материал был намагничен до насыщения, однако величина пара-процесса была незначительной.

Для проверки формулы (9) на рис. 3 отложены по оси абсцисс значения $(\rho_T - \rho_0)I_s$, а по оси ординат $e - e_0$.

Как мы видим, получается прямая линия, в соответствии в (9). Величины $(\rho_T - \rho_0)_{T \rightarrow 0}$, $(e - e_0)_{T \rightarrow 0}$ определялись экстраполяцией приближенно и таким образом, чтобы прямая на рис. 3 проходила через начало координат. Таким образом, уменьшение в области низких температур постоянной эффекта Холла, как обычно ее определяют, обусловлено падением электросопротивления в этой области.

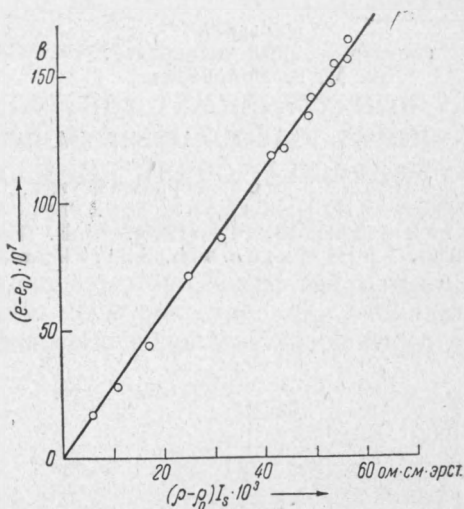


Рис. 3

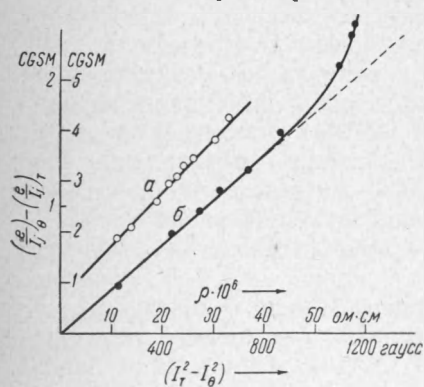


Рис. 4

В заключение следует отметить, что ранее различными авторами ^(4,5) для описания температурной зависимости эффекта Холла была предложена формула

$$R_0 - R_T = C(I_{sT}^2 - I_{s0}^2), \quad (10)$$

где R_0 — значение константы Холла вблизи температуры Кюри; R_T — значение константы для данной температуры T . Поэтому представляет интерес сопоставить результаты расчета по этой формуле с теми, которые получаются при применении формулы (9).

С этой целью по осям ординат и абсцисс были отложены значения постоянной Холла для никеля $R = e/I_j$ по данным Кикоина ⁽³⁾ и значения удельного электросопротивления по данным Мазумото и Ширакава ⁽⁶⁾, соответствующие изменениям от комнатной температуры до температуры Кюри. При этом точки практически ложатся на прямую линию (см. рис. 4, а). Между тем при применении формулы (10) указанная совокупность точек на прямую линию не ложится (см. рис. 4, б).

Таким образом, установленная формула имеет более общее значение, чем ранее предложенная. Вопрос этот имеет принципиальное значение, поскольку линейная зависимость эффекта Холла от произ-

ведения ρI_s должна быть учтена при построении теории эффекта Холла в ферромагнетиках. Очевидно, здесь мы имеем дело со своеобразным $s-d$ -взаимодействием, когда отклонение электронов проводимости под действием магнитных моментов атомов пропорционально среднему значению атомного магнитного момента (т. е. знак отклонения зависит от направления магнитного момента параллельно и антипараллельно результирующему спину).

Московский
государственный университет
им. М. В. Ломоносова

Поступило
22 IV 1954

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Н. С. Акулов, Ферромагнетизм, 1939. ² E. M. Pugh, Phys. Rev., **36**, 1503 (1930). ³ И. К. Кикоин, Sow. Phys., **9**, 1 (1936). ⁴ А. Комар, Н. Волкенштейн, ДАН, **90**, № 5 (1948). ⁵ В. Парфенов, В. Абельс, ДАН, **82**, № 6 (1952). ⁶ H. Masumoto, Shirakawa, Sci. Rep. Tohoku Univ., **25** (1936).