

Е. П. СВИРИНА, Е. Н. ПОЛИВАНОВА

ЭФФЕКТ ХОЛЛА В МАРГАНЦЕВОМ ФЕРРИТЕ С ИЗБЫТКОМ ГАУСМАНИТА ВБЛИЗИ ТЕМПЕРАТУРЫ КЮРИ

Исследован эффект Холла в области парапроцесса феррита Mn с энергией активации носителей тока 0,4 эв. Показано, что температурная зависимость аномального коэффициента Холла определяется изменением концентрации носителей n .

Ферриты с избытком гаусманита отличаются от ферритов с избытком ионов железа большим значением электросопротивления и энергии активации процесса электропроводности. Исследование эффекта Холла в этих материалах представляет интерес. Прежде всего выясняется влияние двух подрешеток в ферритах-шпинелях на аномальный коэффициент Холла в области парапроцесса. Выясняются особенности электропроводности в т. Кюри с учетом изменения энергии активации носителей тока или величины их подвижности с исчезновением магнитного порядка в феррите.

Метод измерения э. д. с. Холла, намагниченности и удельного электросопротивления, а также расчета классического R_0 и спонтанного R_s коэффициентов Холла описан в работе [1].

В ряде работ [2, 8] по эффекту Холла в металлических ферромагнетиках и ферритах было показано, что в области парапроцесса э. д. с. Холла E_x должна быть описана трехчленным выражением

$$E_x = R_0 H + R_s I_s + R_i I_i \quad (1)$$

Здесь R_0 — классический коэффициент Холла, R_s — спонтанный коэффициент, определенный как отношение E_{sx}/I_s спонтанных э. д. с. Холла E_{sx} и намагниченности I_s . Коэффициент R_i характеризует изменение э. д. с. Холла в области парапроцесса с изменением истинной намагниченности I_x .

Сделаем некоторые существенные замечания. Мы считаем, что в статье Игошевой [7] содержится ошибочное утверждение. В ней утверждается, что для описания э. д. с. Холла при наличии парапроцесса достаточно первых двух слагаемых уравнения (1) и что коэффициент R_s равен коэффициенту R_i . Во-первых, вместо соотношения (1) Игошева записывает выражение

$$E_x = R_0 H + R_s I + R_i' I_i, \quad (1')$$

в котором вместо спонтанной намагниченности второго слагаемого соотношения (1) стоит суммарная намагниченность $I = I_s + I_i$ и некоторый коэффициент R_i' , который

в (1') не имеет физического смысла. Коэффициент R_i уравнения (1) мы определяем как тангенс угла наклона прямой $\Delta E_x = f(I_i)$. Согласно Игошевой $R'_i = R_i - R_s$.

Соотношение (1') можно представить также в следующем виде:

$$E_x - (R_0 + R'_i \chi_i) H = R_s I_s + R_s I_i. \quad (1'')$$

Откуда следует, что в области парапроцесса тангенс угла наклона прямой $[E_x - (R_0 + R'_i \chi_i)]$ в функции истинной намагниченности I_i равен спонтанному коэффициенту R_s . Однако это не может служить доказательством того, что в области парапроцесса э. д. с. Холла описывается коэффициентом R_s , так как такой результат получился из-за разделения парапроцессной добавки $R_i I_i$ к э. д. с. Холла E_x при $H > H_s$ на ее составляющие $R_s I_i$ и $R'_i I_i$. При этом составляющая $R_i I_i$ автоматически исключалась.

Второе ошибочное положение работы [7] состоит в способе определения коэффициента R_0 . Предложенным способом определяется не величина R_0 , а некоторая сумма $(R_0 + R'_i \chi_i)$. В этом нетрудно убедиться, если подставить известное выражение для магнитного поля H , справедливое вблизи температуры Кюри, т. е. $H = \alpha I + \beta I^3$ в соотношение (1') и заменить истинную намагниченность восприимчивостью парапроцесса χ_i . Здесь α и β — термодинамические коэффициенты, зависящие от температуры и состава.

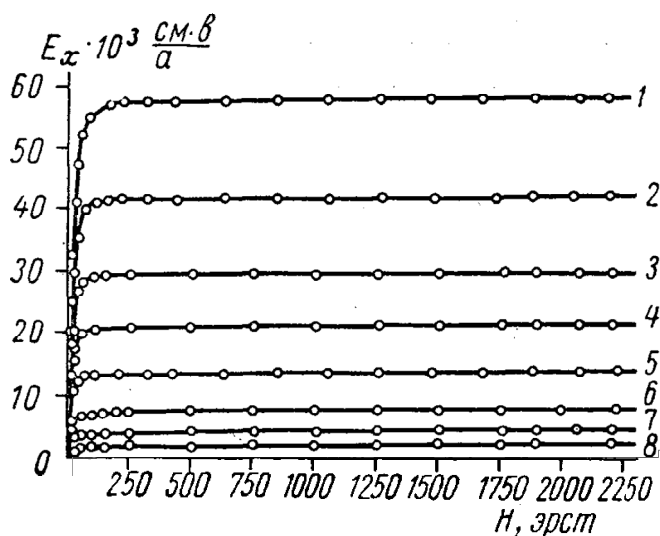


Рис. 1. Зависимость э. д. с. Холла E_x от магнитного поля H при различных температурах для феррита $Mn_{1,5}Fe_{1,5}O_4$. 1 — 405,6°, 2 — 419°, 3 — 432°, 4 — 440°, 5 — 458°, 6 — 464°, 7 — 476° и 8 — 482°K

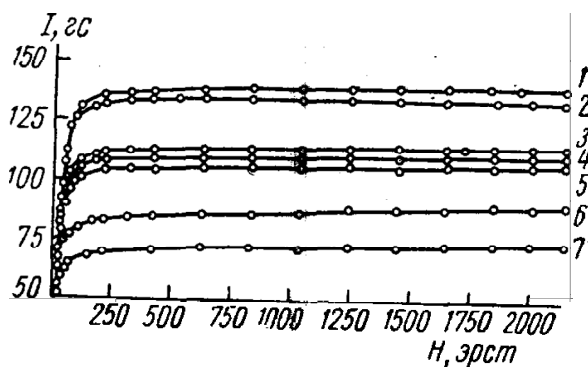


Рис. 2. Кривые намагниченности феррита $Mn_{1,5}Fe_{1,5}O_4$ при различных температурах. 1 — 382,6°, 2 — 405,6°, 3 — 419°, 4 — 432°, 5 — 440°, 6 — 458° и 7 — 464°K

Мы также не согласны с утверждением Игошевой, что в работе [2] парапроцесс не исследовался. Для инварных сплавов и ферритов-шпинелей магнитные поля 3000 эрсг являются достаточными для изучения парапроцесса в области температуры Кюри. На рисунках 1 и 2 приведены изотермы кривых $E_x(H)$ и $I(H)$ для монокристаллического феррита $Mn_{1,5}Fe_{1,5}O_4$. Как видим, техническое насыщение практически заканчивается в магнитных полях до 300 эрсг.

Мы считаем, что трехчленное выражение (1) удобно для описания э. д. с. Холла в ферромагнетиках в общем случае и отражает особенности ее поведения в области парапроцесса.

Ранее было показано (см. [1, 3]), что с изменением температуры величина R_s в металлах и ферритах пропорциональна магнитной части электросопротивления ρ_m . Независимость от температуры коэффициента R'_i указывает на то, что температурно зависящие виды рассеяния носителей тока не являются определяющими в физической его природе. В настоящее время принято считать, что за гальваномагнитные эффекты ответственны спиорбитальные виды взаимодействия [3, 4]. Если предположить, что за коэффициент R'_i ответственно в основном собственное спиорбитальное взаимодействие почти локализованных d -электронов, то различное поведение коэффициентов R_s и R'_i с температурой может быть качественно понятным.

На рисунке 3 представлены кривые э. д. с. Холла E_x в функции намагниченности I для монокристаллических марганцевых ферритов.

Хорошо видно, что для области парапроцесса характерно наличие коэффициента Холла $R_{i\text{эфф}}$, отличного от спонтанного R_s (как тангенс угла наклона при больших и малых значениях I). Рассмотрим, например, кривые $E_x(I)$ для температур 482 и 476° К. Если спонтанный коэффициент R_s уменьшается почти в два раза, то коэффициент $R_{i\text{эфф}}$ остается без изменения. Индекс эффективный показывает, что для ферритов-шпинелей мы имеем дело с двумя подрешетками, в которых размещаются магнитные ионы. Для каждой из этих подрешеток характерна своя истинная константа Холла R_i , и поэтому в области парапроцесса следует ожидать более сложного поведения э. д. с. Холла в функции намагниченности по сравнению с ее поведением в металлических ферромагнетиках. Действительно, приращение э. д. с. Холла в ферритах для магнитных полей H , больших поля технического насыщения H_s , можно записать в виде

$$\Delta E_x = R_{i1} \Delta I_{i1} - R_{i2} \Delta I_{i2}$$

или

$$\Delta E_x = \left(R_{i1} \frac{\Delta I_{i1}}{\Delta I_{i\text{эфф}}} - R_{i2} \frac{\Delta I_{i2}}{\Delta I_{i\text{эфф}}} \right) \Delta I_{i\text{эфф}} = R_{i\text{эфф}} \Delta I_{i\text{эфф}}. \quad (2)$$

Здесь $\Delta I_{i\text{эфф}}$ — суммарное приращение истинной намагниченности для двух подрешеток, а ΔI_{i1} и ΔI_{i2} — истинные намагниченности каждой подрешетки. Знак минус отражает антиферромагнитное упорядочение и не-

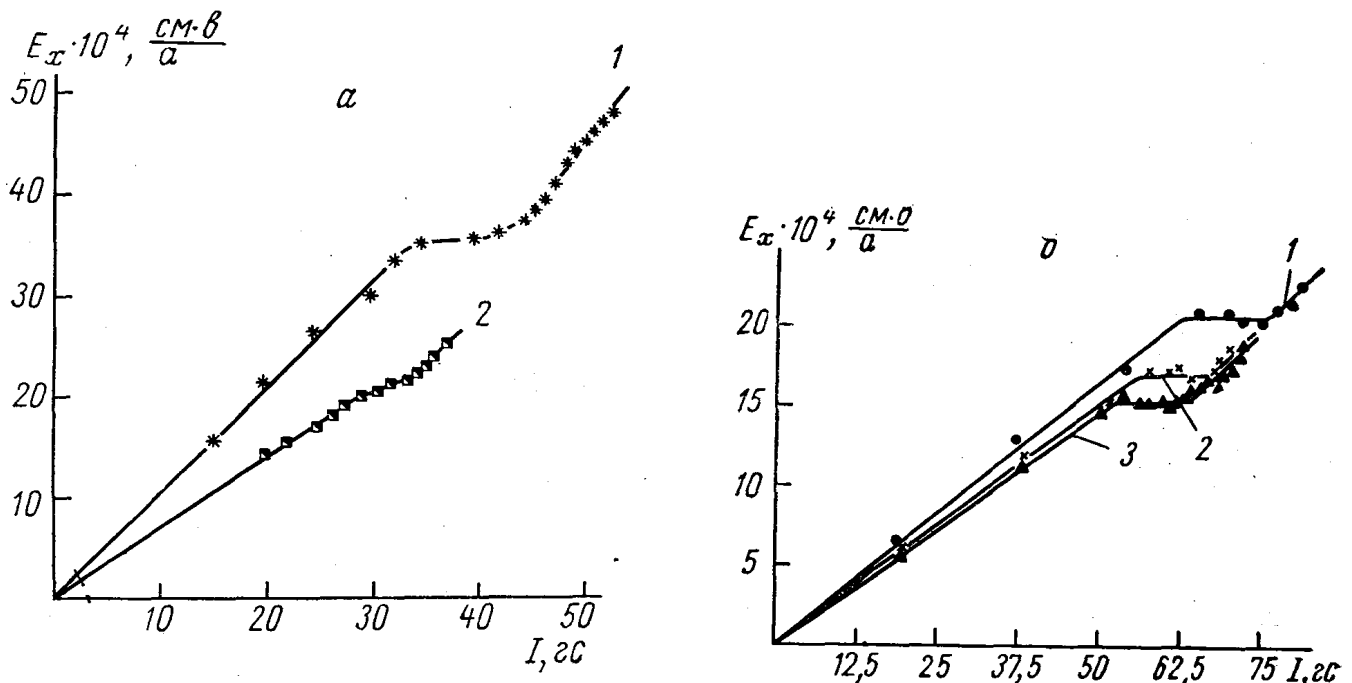


Рис. 3. Зависимость э. д. с. Холла E_x от намагниченности I марганцевых ферритов. a — монокристалл $Mn_{1,5}Fe_{1,5}O_4$: 1 — 476° и 2 — 482°К и b — монокристалл $MnFe_2O_4$: 1 — 502°, 2 — 509°, 3 — 5146~°К

четность эффекта Холла. Такое представление находится в согласии с теорией Турова, Шаврова и Ирхина [5] эффекта Холла в ферримангнетике с точкой компенсации. Тангенс угла наклона прямой $E_x(I)$ в области парапроцесса должен бы определяться выражением в скобках уравнения (2). Однако вместо ожидаемого уменьшения угла наклона кривой $E_x(I)$ в области парапроцесса он заметно увеличивается и сла-

нее зависит от температуры по сравнению со спонтанным коэффициентом Холла R_s .

Поведение э. д. с. Холла в области парапроцесса представляет теоретический интерес. Удивительно то, что для ферритов с двумя подрешетками и сильной зависимостью числа носителей тока от температуры мы имеем картину для э. д. с. Холла в функции намагниченности вблизи температуры Кюри, аналогичную металлическим ферромагнетикам. Возможно, что этот факт указывает на малый вклад d -электронов в электропроводность феррита.

Для ферритов с избытком ионов Fe и малыми значениями энергии активации носителей было показано [1, 6], что температурная зависимость спонтанного коэффициента Холла R_s определяется магнитной частью электросопротивления ρ_m , что следовало из линейной зависимости отношения R_s/R_0 от разности квадратов $(I_{s0}^2 - I_s^2)$, и что темпе-

ратурная зависимость электро-сопротивления в ферритах определяется числом носителей n и их подвижностью μ .

Для феррита Mn с недостатком ионов Fe или избытком гаусманита на рис. 4 представлены классический R_0 и спонтанный R_s коэффициенты Холла, удельное сопротивление ρ и холловская подвижность μ_x в функции температуры. В исследованном нами температурном интервале (300—500° K), именно в области наиболее заметного изменения спонтанной намагниченности (точка Кюри $\sim 485^\circ$ K), аномальный коэффициент Холла R_s и электропроводность описываются экспоненциальной функцией вида

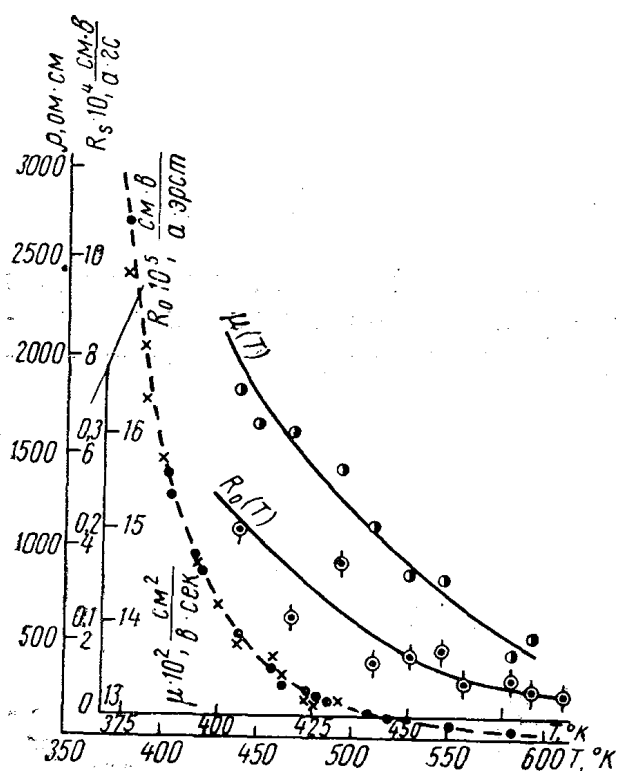


Рис. 4. Температурная зависимость спонтанного R_s и классического R_0 коэффициентов Холла, электросопротивления ρ и холловской подвижности μ_x

$$R_s = Ae^{\frac{\Delta E_{R_s}}{kT}} \quad \text{и} \quad \rho = Be^{\frac{\Delta E_\rho}{kT}}, \quad (3)$$

где A и B — постоянные, а величина $\Delta E_{R_s} \approx \Delta E_\rho 0,39$ эв. Классический коэффициент Холла также экспоненциально уменьшается с ростом температуры, но с энергией активации носителей $\Delta E_n \approx 0,42$ эв. Холловская подвижность μ_x , рассчитанная как отношение R_0/ρ , слабо уменьшается с ростом температуры и имеет численные значения, равные $0,13 \div 0,17$ см²/в·сек.

Из приведенного экспериментального материала следует, что для феррита Mn с избытком гаусманита значение энергии активации носителей тока значительно больше, чем для ферритов с избытком ионов Fe. В этом случае температурная зависимость коэффициента R_s почти полностью определена зависимостью числа носителей тока, именно поэтому значения R_s линейно зависят от общего сопротивления ρ с изменением температуры.

В точке Кюри нет излома в прямой $\ln \rho \left(\frac{1}{T} \right)$. Последнее указывает на малое влияние спонтанной намагниченности на энергетический спектр носителей тока, и поэтому можно ожидать, что выше температуры Кюри для ферритов отношения R_s/R_0 будет иметь постоянное значение. Полученные нами экспериментальные данные по эффекту Холла в ферритах с достаточно большим значением энергии активации процесса проводимости ($>0,3$ эв) представляют интерес, так как указывают на сравнительно малое влияние рассеяния носителей по сравнению с изменением их числа в температурной зависимости электропроводности и спонтанного коэффициента R_s .

В этом случае одновременные измерения R_s и ρ дают возможность определить энергию активации носителей тока и судить о структуре энергетических зон в ферритах. Уменьшение холловской подвижности и экспоненциальное возрастание числа носителей указывает на зонный характер проводимости в феррите марганца с избытком гаусманита.

Авторы признательны проф. К. П. Белову за интерес к работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белов К. П., Свирина Е. П. «Успехи физических наук», **96**, вып. 1, 21, 1968.
2. Свирина Е. П., Новикова Э. А., Поливанова Е. Н. Письма в ЖЭТФ, **9**, вып. 2, 96, 1969.
3. Ирхин Ю. П. Докторская диссертация. Свердловск, 1968.
4. Ву Динь Кы. Докторская диссертация. МГУ, 1967.
5. Туров Е. А., Шавров В. Г., Ирхин Ю. П. ЖЭТФ, **47**, 296, 1964.
6. Свирина Е. А., Алиева М. С., Алексухина И. В. «Вестн. Моск. ун-та», физ., астрон., № 3, 54, 1969.
7. Игошева Т. Н. Письма в ЖЭТФ, **10**, вып. 3, 1969.
8. Волков Д. И. «Вестн. Моск. ун-та», физ., астрон., № 4, 19, 1960.

Поступила в редакцию
24.4 1969 г.

Кафедра
общей физики для биологов