

Р. Г. АННАЕВ

ОБ ИССЛЕДОВАНИИ ТЕРМОМАГНИТНОГО ЭФФЕКТА НЕРНСТА В КРИСТАЛЛЕ КРЕМНИСТОГО ЖЕЛЕЗА И СПЛАВА Ni_3Mn

(Представлено академиком С. И. Вавиловым 23 IV 1949)

Часто встречаются физические явления, характеризующиеся тремя типами анизотропии:

а) естественная анизотропия кристаллов проявляется в том, что ряд явлений, характеризующихся одним параметром-вектором (скорость света, намагничение, упругая деформация и т. д.), будут иметь различные значения по различным направлениям в кристалле;

б) простая анизотропия (в изотропной среде, кристалле) проявляется в том, что физические явления, характеризующиеся двумя и тремя параметрами-векторами, зависят исключительно от взаимной ориентации (углов) этих векторов и совершенно не зависят от их расположения по отношению к осям кристаллов;

в) в случае бианизотропии⁽¹⁾ имеет место наличие естественной и простой анизотропии, т. е. явления, характеризующиеся несколькими параметрами-векторами, зависят не только от взаимного расположения (углов) этих векторов, но и от их ориентации по отношению к осям кристалла.

В частности, к бианизотропии относятся явления четных эффектов в анизотропных кристаллах, а к простой анизотропии — четных и нечетных эффектов в изотропных телах (поликристаллах).

Цель настоящей работы — дать теорию четных и нечетных эффектов в случае простой анизотропии, исследовать термомагнитный эффект Нернста в кристалле кремнистого железа и сверхструктурного сплава Ni_3Mn .

1. Магнито-электрические явления, характеризующиеся одним или несколькими векторами, можно считать периодическими функциями углов между векторами по отношению к произвольно выбранной оси координат для случая простой анизотропии (например, спиновый магнитный момент, вращение магнитного поля в каком-нибудь ферромагнитном кристалле, четные и нечетные эффекты и т. д.). Таким образом, явления, представляющиеся периодическими функциями углов, мы можем разложить в ряд Фурье вида:

$$u = a_0 + a_1 \sin \varphi + a_3 \sin^3 \varphi + \dots + a_{2n-1} \sin^{2n-1} \varphi + \\ + b_2 \cos^2 \varphi + b_4 \cos^4 \varphi + \dots + b_{2n} \cos^{2n} \varphi, \quad (1)$$

где под u подразумевается одно из вышеперечисленных явлений. В частности, будем полагать, что константы a_0 , a_{2n-1} и b_{2n} постоянны для изотропных тел, однако для естественной анизотропии и бианизотропии они могут быть и непостоянными.

2. Рассмотрим нечетные эффекты (Холла, Нернста, Эттингсгаузена и т. п.). В этом случае должны оставаться только члены уравнения (1) с нечетными функциями, т. е. должны оставаться синусы с нечетными степенями. В последнем случае, если ограничиться первым приближением, из (1) будем иметь:

$$E = a_1 \sin \varphi,$$

где $\varphi = \widehat{\mathbf{sg}}$ (\mathbf{s} — вектор намагничения и \mathbf{g} — вектор градиента температуры, по абсолютной величине равные единице). Тогда

$$\sin(\widehat{\mathbf{sg}}) = \left| \begin{array}{ccc} i & j & k \\ s_x & s_y & s_z \\ g_x & g_y & g_z \end{array} \right|, \quad E = a_1 \left| \begin{array}{ccc} i & j & k \\ s_x & s_y & s_z \\ g_x & g_y & g_z \end{array} \right| = a_1 [\mathbf{sg}]. \quad (2)$$

Здесь s_x, s_y, s_z и g_x, g_y, g_z — направляющие косинусы вектора намагничения и вектора градиента температуры относительно осей координат.

Если взять проекцию вектора \mathbf{E} по направлению к единичному вектору измерения \mathbf{r} (\mathbf{r} — вектор, соединяющий две точки, между которыми мы измеряем разность потенциалов), то будем иметь:

$$E_r = a_1 [(s_y g_z - s_z g_y) r_x + (s_z g_x - s_x g_z) r_y + (s_x g_y - s_y g_x) r_z]. \quad (3)$$

Эта формула относится к одному домену и охватывает нечетные эффекты, в частности, термомагнитный эффект Нернста (т.-м. э. Н.).

Н. С. Акулов⁽²⁾ на основе симметрии кристаллов теоретически пришел к выводу, что нечетные эффекты в кристаллах с бианизотропией и простой анизотропией протекают одинаково. Поэтому формула (3) справедлива не только для простой анизотропии, но и для бианизотропии.

3. Рассмотрим четные эффекты (изменения теплопроводности, электропроводности, термоэлектродвижущей силы ферромагнитных металлов под действием магнитного поля, магнитострикции и т. п.) в случае простой анизотропии.

Для этого случая ограничимся вторым (четным) членом разложения ряда (1). Имеем:

$$\alpha = a_0 + b_2 \cos^2 \varphi, \quad (4)$$

где $\varphi = \widehat{\mathbf{sg}}$ (\mathbf{s} — вектор намагничения, \mathbf{g} — вектор-градиент температуры или электротока, по абсолютной величине равные единице). При этом полагается, что вектор измерения \mathbf{r} совпадает с направлением градиента температуры. Тогда

$$\cos(\widehat{\mathbf{sg}}) = (s_x g_x + s_y g_y + s_z g_z), \quad (5)$$

где g_x, g_y, g_z — направляющие косинусы вектора \mathbf{g} на оси координат. Окончательно из (4) и (5) для простой анизотропии четных эффектов имеем:

$$\alpha = a_0 + b_2 (s_x^2 g_x^2 + s_y^2 g_y^2 + s_z^2 g_z^2) + 2 b_2 (s_x s_y g_x g_y + s_x s_z g_x g_z + s_y s_x g_y g_x), \quad (6)$$

где a_0 и b_2 — параметры простой анизотропии.

Формула (6) относится исключительно к случаю простой анизотропии четных эффектов.

4. Из представлений развитой нами выше теории можно вывести⁽⁴⁾ также свободную энергию (естественной) анизотропии ферромагнитных кристаллов кубической системы^(2,3).

5. С целью проверки формулы (3) нами был исследован монокристалл кремнистого железа ($4\% \text{ Si} + 96\% \text{ Fe}$). Результаты наших наблюдений над термомагнитным эффектом Нернста представлены на рис. 1. Кривая 1 соответствует случаю, когда градиент температуры g параллелен оси кристалла $[100]$ и перпендикулярен направлениям магнитного поля H и измерения r , т. е. $g \parallel [100] \perp H \perp r$, кривая 2 $g \parallel [110] \perp H \perp r$, кривая 3, когда $g \parallel [110] \perp r$ (вектора g , H и r не лежат в одной плоскости), а H направлено под углом 45° к оси $[110]$ (в плоскости (001)).

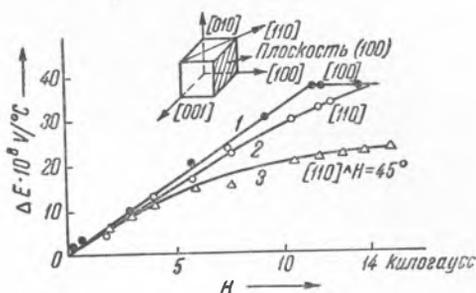


Рис. 1. Термомагнитный эффект Нернста в кристалле кремнистого железа ($96\% \text{ Fe} + 4\% \text{ Si}$); разность температур спаев $T_2 - T_1 = 92^\circ$, $T_1 = 8^\circ$. 1 — градиент температуры g параллелен оси $[100]$ и перпендикулярен направлениям магнитного поля H и измерения r , т. е.: $g \parallel [100] \perp H \perp r$; 2 — $g \parallel [110] \perp H \perp r$; 3 — $g \parallel [110] \perp r$, $H \parallel [110] = 45^\circ$

Экспериментальные результаты вместе с вычислениями величины т.-м. э. Н. при $H = 14$ килоэрстед и разности температур спаев, равным 92° , приведены в табл. 1.

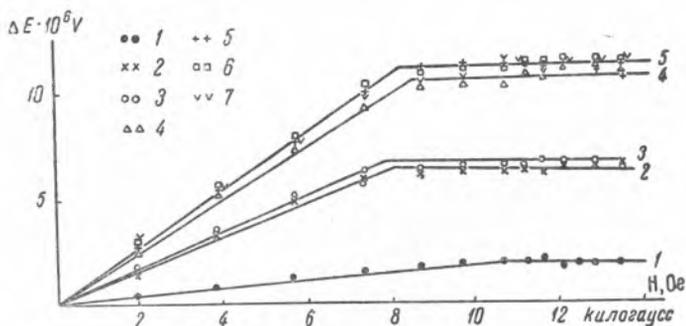


Рис. 2. Термомагнитный эффект Нернста сплава Ni_3Mn в зависимости от времени выдержки при 397° с последующим быстрым охлаждением на воздухе. Выдержки: 1 — 5 мин., 2 — 30 мин., 3 — 1 час, 4 — 4 часа, 5 — 10 час., 6 — 15 час., 7 — 24 часа 25 мин.

6. Резкая зависимость постоянной Холла от технического и спонтанного намагничивания, а также и от дальнего порядка ($5, 6$) указывает на возможную зависимость постоянной Нернста от этих величин. Ввиду этого мы исследовали т.-м. э. Н. на сплаве состава Ni_3Mn , исследованный ранее автором (7).

Результаты наблюдений представлены на рис. 2 и 3, которые показывают, что постоянная Нернста и т.-м. э. Н. зависят от количества упорядоченной фазы сплава Ni_3Mn .

Вычисление по формуле (3)	Наблюдение	Постоянная Нернста $Q \cdot 10^4 \text{ CGSM}$
$\Delta E_{[100]_S} = -a_1 \dots \dots \dots$	$-37 \cdot 10^{-8} \text{ В/}^\circ\text{C}$	-27,1
$\Delta E_{[110]_S} = -a_1 = -37 \cdot 10^{-8} \text{ В/}^\circ\text{C} \dots \dots \dots$	$-37 \cdot 10^{-8} \text{ »}$	-27,1
$\Delta E_{[110]_S} \hat{H} = -\frac{a_1}{\sqrt{2}} = -25,8 \cdot 10^{-8} \text{ В/}^\circ\text{C} \dots \dots \dots$	$-25 \cdot 10^{-8} \text{ »}$	-17,8

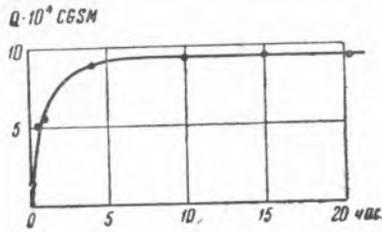


Рис. 3. Зависимость постоянной Нернста сплава Ni_3Mn от времени выдержки при 397° ($H_s = 10$ килоэрстед, разность температур спаев $T_2 - T_1 = 118^\circ$, $T_1 = 6^\circ$)

Термомагнитный эффект Нернста на монокристалле кремнистого железа и сплава Ni_3Mn изучался впервые нами.

Наши наблюдения согласуются с теориями Н. С. Акулова⁽²⁾ и Н. Л. Писаренко⁽⁸⁾.

Физико-технический институт
Туркменского филиала
Академии наук СССР

Поступило
8 IV 1949

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Н. С. Акулов и Р. Г. Аннаев, ЖЭТФ, 8, 334 (1938). ² Н. С. Акулов, Ферромагнетизм, 1939. ³ С. В. Вонсовский и Я. С. Шур, Ферромагнетизм, 1948. ⁴ Р. Г. Аннаев, Докторская диссертация, НИИФ МГУ, 1948. ⁵ И. К. Киикоин, Sow. Phys., 9, 1 (1936); ЖЭТФ, 10, 1242 (1943). ⁶ А. П. Комар и Н. Волкенштейн, ДАН, 60, № 5 (1948). ⁷ Р. Г. Аннаев, ДАН, 61, № 6 (1948). ⁸ Н. Л. Писаренко, Изв. АН СССР, сер. физ., 5, № 4—5, 417 (1941).