

МЕТАМАГНИТОУПРУГОСТЬ И МЕТАМАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСТВО ЯН-ТЕЛЛЕРОВСКИХ КРИСТАЛЛОВ

М.Д.Каплан

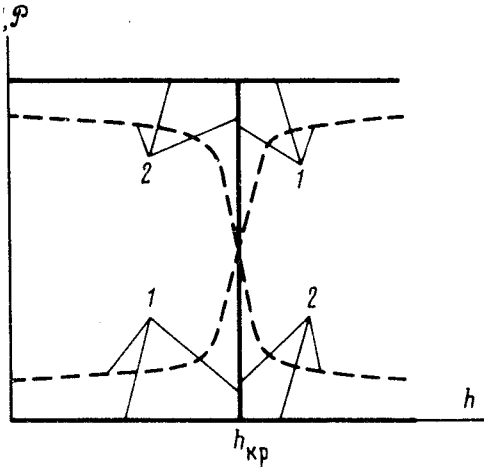
На основе микроскопической теории предсказывается новое явление метамагнитоупругости и метамагнитоэлектричества в ян-теллеровских антиферроэластиках.

1. Хорошо известное явление метамагнетизма заключается в резком нелинейном росте магнитного момента при увеличении внешнего магнитного поля и является характерным для антиферромагнетиков изинговского типа. В физике эластиков-кристаллов с фазовыми переходами, при которых параметром порядка является деформация, — аналогично антиферромагнетикам в магнетизме возможно исследование систем с антиферродисторсионным упорядочением. В микроскопической теории структурных фазовых переходов, основанной на кооперативном эффекте Яна — Теллера¹, показано, что для широкого класса эластиков фазовый переход является следствием межэлектронного взаимодействия изинговского типа. Естественно, что для подобных антиферроэластиков аналогично метамагнетизму характерно явление метаупругости, заключающееся в сильно нелинейном поведении деформации как функции давления. В последнее время получен ряд экспериментальных результатов, свидетельствующих об обнаружении таких кристаллов^{2,3}. С другой стороны антиферродисторсионная фаза системы может быть реализована и в ферроэластиках под действием внешних полей⁴. В связи с этим представляет особый интерес исследование специфических свойств ян-теллеровских антиферроэластиков. Как показывает рассмотрение, для них характерно такое необычное свойство как метамагнитоупругость, сопровождающаяся метамагнитоэлектричеством.

Особенностью ян-теллеровских систем является тесная взаимосвязь структурных и магнитных свойств. Это обстоятельство отмечалось в работе⁵ при исследовании обусловленных обменом орбитальных и спиновых упорядочений в соединениях переходных металлов. В отличие от последних в редкоземельных соединениях вследствие сильной спин-орбитальной связи состояния ян-теллеровского иона характеризуются полным моментом, через компоненты которого выражаются как операторы магнитных моментов, так и псевдоспинов, упорядочивающихся при структурном фазовом переходе. При этом возникающие ниже критической температуры молекулярные поля играют роль энергий магнитной анизотропии. С другой стороны, наоборот возможны ситуации, как, например, в соединениях диспрозия, когда магнитные поля, действующие в базисной плотности кристалла, поддерживают спонтанную деформацию (при этом операторы магнитного момента и параметры порядка коммутируют). В таких антиферроэластиках магнитное поле может перевернуть подрешетку псевдоспинов, действуя против межподрешеточного молекулярного поля и переводя кристалл в ферродисторсионную фазу. Этому соответствует резкое нелинейное возрастание деформации как функции магнитного поля. Такое явление может быть названо метамагнитоупругостью. С другой стороны в рассматриваемых кристаллах дисторсионное упорядочение может сопровождаться упорядочением дипольных моме-

в ⁴, вследствие чего метамагнитоупругое поведение сопровождается метамагнитоэлектрическим — резко нелинейным изменением поляризации с ростом магнитного поля. Сказанное проиллюстрируем на примере антиферроэластиков со структурой циркона.

2. Рассмотрим кристалл типа $DyVO_4$. Два ян-теллеровских иона в ячейке связаны операцией инверсии. При $T > T_c$ нижайшие состояния Dy^{3+} — два крамерсовых дублета Γ_7 и Γ_6 , разделенных щелью и смешивающихся колебаниями b_2 -симметрии, вследствие чего возникает межэлектронное взаимодействие, приводящее к фазовому переходу. При $T < T_c$ в каждой подрешетке действуют молекулярные поля разных знаков, что обуславливает различную анизотропию g -факторов, при которой $g_x \gg g_{y,z}$ для основного состояния и $g_y \ll g_{x,z}$ — для возбужденного в одной подрешетке и наоборот — в другой. Соответственно этому магнитное поле $H \parallel x$ поддерживает деформацию вдоль x -оси, а $H \parallel y$ — вдоль y -оси. Однако в рассматриваемом случае тригональной симметрии соответствующие деформации отличаются знаком, откуда и следует возможность индуцированного магнитным полем метаэластического перехода.



Зависимости спонтанной деформации и поляризации от внешнего магнитного поля при $\Delta = 0$: 1 — $U(h)$; 2 — $P(h)$; ————— $T = 0$; — — — — — $T \neq 0$

Гамильтониан электронной подсистемы для a -той подрешетки в приближении молекулярного поля имеет вид

$$H_a = (A\bar{\sigma}_z^a + B\bar{\sigma}_z^{a'}) \pm f\chi_0\mathcal{E} \sigma_z^a + \Delta \gamma \sigma_x^a - h_x S_x^a - h_y S_y^a, \quad (1)$$

де \mathcal{E} — электрическое поле, $h_i = \frac{1}{2} g \mu_B H_i$, γ — фактор вибронной редукции, A и B — константы внутри- и межподрешеточного взаимодействия (в рассматриваемой системе $B < 0$ в отличие от реального кристалла $DyVO_4$, где $B > 0$ и при $T < T_c$ реализуется не антиферро-, а ферродисорсионная фаза). Спектр системы определяется формулами

$$E_{1,2,3,4}^a = \pm \frac{h}{2} f_{1,2}(\theta) \pm \sqrt{\left[H_{mol}^a - \frac{h}{2} f_2(\theta) \right]^2 + \Delta^2 \gamma^2}, \quad (2)$$

де $h = \sqrt{h_x^2 + h_y^2}$, $f_{1,2}(\theta) = \cos \theta \pm \sin \theta$, θ — угол между магнитным полем и x -осью, $H_{mol}^a = A\bar{\sigma}_z^a + B\bar{\sigma}_z^{a'} \pm f\chi_0\mathcal{E}$. Используя выражения (2), можно получить систему трансцендентных уравнений для подрешеточных параметров порядка

$$\bar{\sigma}_z^a = \frac{2}{z_a} \left[\left(H_{mol}^a - \frac{h}{2} f_2(\theta) \right) (E_a^-)^{-1} \exp\left(-\frac{\beta h}{2} f_1(\theta)\right) \operatorname{sh} \beta E_a^- + \left(H_{mol}^a + \frac{h}{2} f_2(\theta) \right) (E_a^+)^{-1} \exp\left(\frac{\beta h}{2} f_1(\theta)\right) \operatorname{sh} \beta E_a^+ \right], \quad (3)$$

где

$$E_a^+ = \sqrt{\left[H_{mol}^a \pm \frac{h}{2} f_2(\theta) \right]^2 + \Delta^2 \gamma^2}, \quad (4)$$

$$Z_a = 2 \left[\exp\left(-\frac{\beta h}{2} f_1(\theta)\right) \operatorname{ch} \beta E_a^- + \exp\left(\frac{\beta h}{2} f_1(\theta)\right) \operatorname{ch} \beta E_a^+ \right]. \quad (5)$$

Система уравнений (3) описывает температурное и полевое поведение спонтанных деформации $U \sim (\bar{\sigma}_z^I + \bar{\sigma}_z^{II})$ и поляризации $\mathcal{P} \sim (\bar{\sigma}_z^I - \bar{\sigma}_z^{II})$. Из анализа свободной энергии следует, что при $H = \mathcal{E} = 0$ и $T < T_c$ реализуется антиферродисторсионная фаза. Магнитное поле, действуя против молекулярного поля одной из подрешеток, может перевернуть последнюю, переводя кристалл в ферродисторсионную антисегнетоэлектрическую фазу (см. рисунок).

3. Обсудим возможность экспериментального наблюдения эффектов. Таких возможностей, на наш взгляд, — две. Первая связана с реальными кристаллами DyVO_4 , DyAsO_4 . Хотя они являются ферроэластиками, но воздействуя электрическим полем, их можно перевести в антиферродисторсионную сегнетоэлектрическую фазу⁴. При этом метамагнитоупругое поведение кристалла осуществляется в магнитных полях, действующих против межподрешеточного взаимодействия и электрического поля.

Другая возможность связана с использованием кристаллов двойных вольфрамов и молибдатов. В этих кристаллах обнаружены ян-теллеровские фазовые переходы⁶, которые исходя из ряда результатов, полученных в работах^{2,3}, могут быть отнесены к антиферродисторсионным. Однако, в этих соединениях, по-видимому, антиферродисторсионная фаза является антисегнетоэлектрической. Хотя ситуация здесь несколько сложнее чем в цирконах, полученные выше результаты к ним применимы. Оценки величины критического магнитного поля, вызывающего метаупругое поведение кристалла дают $H \sim 3 - 10 T$, что достижимо в эксперименте.

Выражаю искреннюю благодарность Б.Г. Вехтеру за обсуждение результатов работы.

Литература

1. Gehring G.A., Gehring K.A. Rep. Prog. Phys., 1975, 38, 1.
2. Cooke A.H., Davidson M.N., England N.J., Leasu M.J.M., Louny J.B., Tropper A.C., Wells M.R. J. Phys. C: Sol. St. 1976, 9, L573.
3. Ельчанинова С.Д., Андерс С.Д., Звягин А.И., Кобец М.И., Литвиненко Ю.Г. ФНТ, 1981, 7, 187.
4. Вехтер Б.Г., Каплан М.Д. Письма в ЖЭТФ, 1979, 23, 173; ЖЭТФ, 1980, 78, 1781.
5. Кугель К.И., Хомский Д.И. Письма в ЖЭТФ, 1976, 23, 264; Khomskoo D.I., Kugel K.I. Phys. Stat. Sol. (b), 1977, 79, 441.
6. Rytte E. Phys. Rev., 1974, B9, 932.
7. Звягин А.И., Стещенко Т.С., Юрко В.Г., Вайшнорас Р.А. Письма в ЖЭТФ, 1973, 17, 135.