

Академик АН УССР А. А. ГАЛКИН, С. Н. КОВНЕР, П. И. ПОЛЯКОВ

РЕЗОНАНСНЫЕ СВОЙСТВА АНТИФЕРРОМАГНИТНОГО ДИГИДРАТА ХЛОРИДА МЕДИ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Имеется большое число теоретических и экспериментальных работ ⁽¹⁾, которые посвящены изучению свойств антиферромагнитного дигидрата хлорида меди $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, имеющего температуру Нееля $T_N = 4,31^\circ \text{K}$. В наших предшествующих работах ⁽²⁾ детально изучены резонансные свойства $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ в низкочастотной области. Было обнаружено новое промежуточное состояние антиферромагнетика во внешнем магнитном поле $H_{\parallel}$, при котором он разбивается на домены двух магнитных фаз ($H_{\parallel}$ — критическое поле перехода из состояния с $\mathbf{H} \parallel \mathbf{l}$ в состояние с $\mathbf{H} \perp \mathbf{l}$, $\mathbf{l}$ — вектор антиферромагнетизма).

Представляет интерес изучить влияние гидростатического давления на резонансные свойства $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ в промежуточном состоянии. Давление является тем дополнительным параметром, с помощью которого можно исследовать термодинамический потенциал антиферромагнетика с учетом его магнитоупругих свойств, а также изучить микроскопическую природу эффективных магнитных полей (H_E — обменного и H_A — анизотропии), зависящих от межатомных расстояний в кристалле. В настоящей работе впервые, насколько нам известно, изучено влияние гидростатического давления на антиферромагнитный резонанс.

Резонансные свойства $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ на низких частотах $\nu_1 = 3,7$ ГГц и $\nu_2 = 0,9$ ГГц, соответствующих области промежуточного состояния, исследовались при давлениях P от 0 до 10 кбар. На частоте ν_1 во внешнем магнитном поле $\mathbf{H}$, параллельном (ab)-плоскости кристалла, наблюдались две линии резонансного поглощения, соответствующие значениям меньшего $H_1^{\text{рез}}$ и большего $H_2^{\text{рез}}$ резонансных полей, а на частоте ν_2 — одна линия при $H^{\text{рез}} = H_{\parallel}$.

1. Зависимость значений резонансных полей от давления $H^{\text{рез}} = H_{1,2}^{\text{рез}}(P)$ исследовалась при минимальной температуре $T = 1,7^\circ \text{K}$. Был обнаружен систематический рост значений резонансных полей $H_{1,2}^{\text{рез}}$ с повышением давления от 0 до 10 кбар. Наблюдалось совпадение значений резонансных полей $H_2^{\text{рез}}(P)$ на частоте ν_1 со значениями $H^{\text{рез}}(P) = H_{\parallel}(P)$ на частоте ν_2 (см. рис. 1).

2. На тех же частотах ν_1 и ν_2 при ориентации поля $\mathbf{H}$ параллельно легкой оси $\mathbf{a}$ в (ab)-плоскости кристалла изучена температурная зависимость значений резонансных полей $H^{\text{рез}} = H^{\text{рез}}(T)$ в температурном интервале $(1,7-4,2)^\circ \text{K}$ при увеличении давления от 0 до 10 кбар. Как видно из рис. 2, при $P = 0$ зависимость меньшего резонансного поля $H_1^{\text{рез}}(T)$ имеет некоторый характерный максимум ^(2, 3) в области $T \simeq 3^\circ \text{K}$, в то время как $H_2^{\text{рез}}(T)$ монотонно растет, повторяя ход $H_{\parallel}(T)$ во всем интервале температур. При давлениях 3,8 и 7,3 кбар как зависимость $H^{\text{рез}}(T)$, так и $H_2^{\text{рез}}(T)$ существенно меняют свой характер. Резко падает крутизна роста $H_2^{\text{рез}}(T)$, т. е. уменьшается угол наклона кривой к оси температур. На зависимости $H_1^{\text{рез}}(T)$ исчезает отмеченный максимум, и по характеру она приближается к виду зависимости $H_2^{\text{рез}}(T)$.

Существенно, что повышение давления до $\simeq 7,3$ кбар увеличило температурный интервал, в котором стало возможным наблюдать резонансное

поглощение, вплоть до $T \approx 4,2^\circ \text{K}$, тогда как при $P=0$ температурный интервал ограничивался значениями $T \approx 3,5^\circ \text{K}$.

3. При минимальной температуре $T = 1,7^\circ \text{K}$ на частоте ν_1 исследована зависимость резонансных полей $H_{1,2}^{\text{рез}}$ от угла ψ между легкой осью a и внешним магнитным полем H , лежащим в (ab) -плоскости кристалла при давлениях от 0 до 10 кбар. Резонансное поглощение наблюдалось лишь в случае, когда угол наклона не превышал некоторого критического значе-

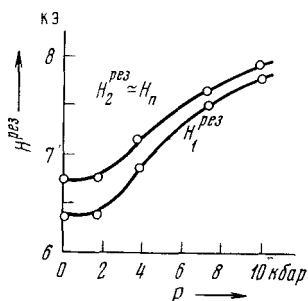


Рис. 1

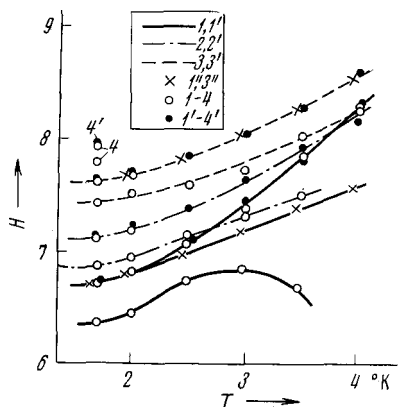


Рис. 2

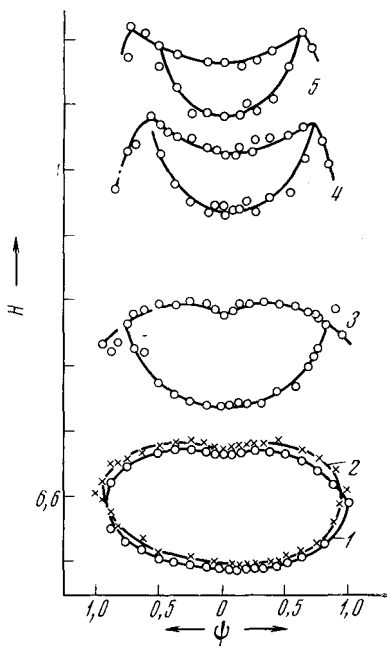


Рис. 3

Рис. 1. Зависимость значений резонансных полей от давления P на частоте $\nu_1 = 3,7$ ГГц при $H \parallel (ab)$ и $T = 1,7^\circ \text{K}$

Рис. 2. Зависимость $H^{\text{рез}}(T)$ на частотах $\nu_1 = 3,7$ ГГц (1-4), $\nu_2 = 0,9$ ГГц (1'-4') при $T = 1,7^\circ \text{K}$ и различных давлениях: 1, 1' - $P = 0$; 2, 2' - 3,8 кбар; 3, 3', 3'' - 7,3; 4, 4' - 10 кбар; 1'', 3'' - теоретические кривые

Рис. 3. Зависимость $H^{\text{рез}}(\psi)$ на частоте $\nu_1 = 3,7$ ГГц при $T = 1,7^\circ \text{K}$ и различных давлениях: 1 - $P = 0$; 2 - 1,7 кбар; 3 - 3,8; 4 - 7,3; 5 - 10 кбар. Одно деление по оси ординат соответствует 0,2 кэ

ния $\psi_{\text{пред}}$, зависящего от частоты и давления. На частоте ν_1 величина $\psi_{\text{пред}}$ уменьшилась от $\sim 1,4^\circ$ до $\sim 0,5^\circ$ при росте давления от 0 до 10 кбар. Была обнаружена характерная для $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (⁴) впадина на кривых $H_2^{\text{рез}}(\psi)$ для большего резонансного поля. «Глубина» впадины составляла ≈ 20 э при $P = 0$, ≈ 50 э при $P = 3,8$ кбар, ≈ 100 э при $P = 7,3$ кбар и 120 э при $P = 10$ кбар. Также обнаруживается заметный рост значений

угла $\psi_{\max}$, соответствующего максимальным значениям большего резонансного поля $H_2^{\text{рез}}(\psi)$: от $\approx 0,25^\circ$ при $P = 0$ до $\approx 0,7^\circ$ при $P = 7,3$ кбар.

4. Строгая теоретическая интерпретация экспериментальных результатов требует учета коэффициентов упругости и термического расширения для антиферромагнитного $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, данные о которых в настоящее время отсутствуют. Тем не менее качественное сравнение эксперимента с теорией провести можно. Из теории ⁽²⁾ температурная зависимость H_{π} определяется соотношением

$$H_{\pi}(T) = H_{\pi} \left[1 + \frac{2}{3S} \left(\frac{T}{SJ} \right)^2 \right] \approx 6,5 + aT^2 (\text{кэ}), \quad (1)$$

где $H_{\pi} = 6,5$ кэ — поле перехода при $T = 0^\circ \text{K}$, S — спин, равный $1/2$, и J — обменный интеграл. Причем выражение (1) справедливо, строго говоря, для области температур $T \ll T_N$. Для $P = 0$ область согласия с экспериментом (см. рис. 2) ограничена интервалом $T \lesssim 2,2^\circ \text{K}$. С повышением давления эта область увеличивается до более высоких температур $T \approx 4,2^\circ \text{K}$, что можно отнести за счет повышения температуры Нееля T_N с ростом P . Уменьшение угла наклона кривых на рис. 3 или коэффициента a в выражении (1) для $P \neq 0$, по-видимому, связано с увеличением J при повышении давления, что подтверждается также увеличением T_N .

Теоретически было показано ⁽¹⁾, что впадина на резонансной диаграмме $H_2^{\text{рез}}(\psi)$ определяется энергией магнитной анизотропии H_A и глубина ее δH пропорциональна $\delta H \sim H_A^2$. Поэтому рост глубины впадины на диаграммах $H_2^{\text{рез}}(\psi)$ (рис. 3) в наклонных магнитных полях свидетельствует о росте энергии магнитной анизотропии с ростом давления. Росту как H_A , так и H_E не противоречит факт возрастания значений резонансных полей $H_{1,2}^{\text{рез}}(P)$ при увеличении давления (рис. 1).

Сравнение экспериментальных данных о зависимости $H_2^{\text{рез}}(\psi)$ при различных температурах и давлениях показывает, что повышение давления по своему эффекту в известной мере эквивалентно понижению температуры.

Работа докладывалась на XVII Всесоюзном совещании по физике низких температур, Донецк, июнь, 1972 г.

Авторы выражают благодарность В. В. Барьяхтару и В. А. Попову за полезное обсуждение проблемы.

Донецкий физико-технический институт
Академии наук СССР

Поступило
14 VIII 1972

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ А. С. Боровик-Романов, Итоги науки, 4, М., 1962. ² В. Г. Барьяхтар, А. А. Галкин и др., Письма ЖЭТФ, 9, 456 (1969); ЖЭТФ, 10, 292 (1969); ЖЭТФ, 58, 494 (1970). ³ M. Date, M. Motokawa, J. Phys. Soc. Jap., 22, 165 (1967). ⁴ В. Г. Барьяхтар, А. А. Галкин и др., ДАН, 190, 1056 (1970); В. А. Попов, В. И. Скиданенко, В сборн. Физика конденсированного состояния, в. 14, Харьков, 1971, стр. 121.