

$$C_d = \frac{N}{64} f (1 - p^2) (3 + 2p^2) \sigma^2 \quad (12)$$

и величина  $\bar{a}^2$  не влияет на значение теплоемкости. Отметим, что даже при  $\bar{a}^2 = 0$  зависимость теплоемкости от поляризации при  $f=1$  и при  $f \ll 1$  существенно различна (множитель  $3 - 2p^2$  меняется на  $3 + 2p^2$ ).

Учет нелинейных эффектов по спиновой температуре позволил продвинуться за пределы высокотемпературного приближения для подсистемы взаимодействий при отсутствии разведения ( $f=1$ ), а метод концентрационного разложения [5] — при сильном разведении ( $f \ll 1$ ). Однако получение вне высокотемпературного приближения для подсистемы взаимодействий формул типа (5) — (8), справедливых при любой концентрации спинов, весьма проблематично.

Автор благодарен В. А. Адаркину за обсуждения, стимулировавшие выполнение данной работы.

### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Абрагам А., Гольдман М. Ядерный магнетизм: порядок и беспорядок. М.: Мир. 1984. Т. 1, 2.
- [2] Abragam A., Chapellier M., Coldman M., Jacquinet J. F. // J. Magn. Reson. 1973. V. 10. N 3. P. 322—346.
- [3] Goldman M., Jacquinet J. F., Chapellier M., Vu Hoang Chau // J. Magn. Reson. 1975. V. 18. N 1. P. 22—40.
- [4] Сабиров Р. Х. // УФЖ. 1988. Т. 33. № 6. С. 885—888.
- [5] Хеннер Е. К. // ФТТ. 1988. Т. 30. № 9. С. 2569—2575.

Пермский государственный  
педагогический институт  
Пермь

Поступило в Редакцию  
18 января 1989 г.  
В окончательной редакции  
3 апреля 1989 г.

УДК 536.48; 537.622

Физика твердого тела, том 31, в. 8, 1989  
Solid State Physics, vol. 31, N 8, 1989

## МАГНИТНОЕ УПОРЯДОЧЕНИЕ ПРИ ДАВЛЕНИЯХ ДО 2.2 ГПа И УПРУГИЕ СВОЙСТВА СОЕДИНЕНИЙ $\text{CuM}_2\text{Vr}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

В. П. Дьяконов, В. И. Маркович

Ранее было установлено [1-3], что в гейзенберговских ферромагнетиках  $\text{CuM}_2\text{Vr}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  ( $M = \text{NH}_4, \text{Rb}$ ) обменные взаимодействия в двух ближайших координационных сферах имеют ферромагнитный характер. При этом рост температуры Кюри при всестороннем сжатии до 1 ГПа происходит за счет увеличения обмена в первой координационной сфере  $\mathcal{J}_1$ , так как эффективный обмен во второй координационной сфере  $\mathcal{J}_2$ , являющийся суперпозицией сверхобмена в базисной плоскости  $\mathcal{J}_{2\parallel}$  и вдоль оси  $C_4 - \mathcal{J}_{2c}$ , под давлением уменьшается [4].

Исследования изоморфных соединений с хлором  $\text{CuM}_2\text{Cl}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  [5], у которых  $\mathcal{J}_1 > 0$ ,  $\mathcal{J}_2 < 0$ , показали, что антиферромагнитное взаимодействие  $\mathcal{J}_{2c}$ , при котором осуществляется  $\sigma$ -связь между двумя наполовину заполненными  $\psi(x^2 - y^2)$  орбиталями, возрастает с уменьшением размеров элементарной ячейки вдоль тетрагональной оси, что при достаточно больших давлениях ( $P > 1$  ГПа) приводит к качественному изменению характера зависимости  $T_c(P)$ . Так, в  $\text{CuRb}_2\text{Cl}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  рост  $T_c(P)$  при  $P \approx 1.5$  ГПа практически прекращается, а критическая температура  $\text{CuK}_2\text{Cl}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{Cu}(\text{NH}_4)_2\text{Cl}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  начинает резко уменьшаться при  $P \approx 1$  ГПа.

В отличие от ферромагнетиков  $\text{CuM}_2\text{Cl}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  соединения с бромом имеют наибольшие параметры решетки в гомологическом ряду кристаллов  $\text{CuM}_2\text{X}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  и параметр обмена  $\mathcal{J}_2 > 0$ .

В настоящей работе измерялась магнитная восприимчивость двух вышеуказанных кристаллов под давлением до 2.2 ГПа в интервале температур 0.4—4.2 К. Для измерения восприимчивости применялся индукционный метод на переменном токе. Амплитуда переменного магнитного поля частотой 30 Гц не превышала 0.5 Э.

Специальный двухслойный контейнер камеры высокого давления (КВД), плунжер, толкатель и обтюратор изготовлены из высокопрочного немагнитного сплава 38ХНЮ, термообработанного на твердость НРС  $\sim 45$  (внутренний диаметр  $\varnothing 6.5$  мм, наружный — 31 мм). Максимальное нагружение на поршень, создаваемое на прессе, составляло при комнатной температуре около 9 т. Давление в канале КВД определялось по температуре сверхпроводящего перехода олова, согласно калибровке [6]; погрешность в определении давления  $\pm 0.03$  ГПа. Ошибка в измерении температуры оценивается в 5 мК. Исследования выполнены на монокристаллических образцах: диаметр  $\sim 2$  мм, длина  $\sim 6$  мм, масса  $\sim 0.05$  г.

Упругие константы и сжимаемости соединения  $\text{Cu}(\text{NH}_4)_2\text{Br}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

T, К	$C_{11} \cdot 10^{-9}$	$C_{33} \cdot 10^{-9}$	$C_{44} \cdot 10^{-9}$	$C_{66} \cdot 10^{-9}$	$C_{12} \cdot 10^{-9}$	$C_{13} \cdot 10^{-9}$	$\beta_{\parallel} \cdot 10^2$	$\beta_{\perp} \cdot 10^2$	$\Delta_v \cdot 10^2$
	Н/м <sup>2</sup>						ГПа <sup>-1</sup>		
295 77	$24.1 \pm 0.2$ $29.1 \pm 0.3$	$33.1 \pm 0.3$ $37.8 \pm 0.4$	$8.47 \pm 0.05$ $10.1 \pm 0.1$	$7.30 \pm 0.05$ $9.3 \pm 0.1$	$12.0 \pm 0.7$ $15.9 \pm 0.7$	$9.8 \pm 0.7$ $11.4 \pm 0.8$	$1.65 \pm 0.10$ $1.54 \pm 0.10$	$2.32 \pm 0.20$ $1.86 \pm 0.20$	$6.0 \pm 0.6$ $5.1 \pm 0.6$

Для получения информации о сжимаемости исследуемых магнитодиэлектриков и соответственно об изменении расстояний между магнитными ионами  $\text{Cu}^{2+}$  под давлением были изучены упругие свойства соединения  $\text{Cu}(\text{NH}_4)_2\text{Br}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . Упругие параметры определялись по данным измерения скорости звука в монокристаллических образцах при температурах 77 и 295 К. Заметим, что скорости звука при температурах  $T < 100$  К в пределах ошибки эксперимента ( $\sim 2\%$ ) практически не зависят от температуры. Методика ультразвуковых измерений описана в [7].

Для кристаллов тетрагональной симметрии направления, в которых упругие волны распространяются в виде чистых мод, хорошо известны [8]. Из измерений скоростей продольного и поперечного звуков в этих направлениях определены все компоненты тензора упругих постоянных  $C_{ij}$  ( $i, j=1, 2, \dots, 6$ ). При помощи значений упругих констант  $C_{ij}$ , оценены упругие податливости  $S_{ij}$  ( $i, j=1, 2, \dots, 6$ ) и по соотношениям для тетрагональной сингонии [9] рассчитаны величины линейных  $\beta_{\parallel}$  (в направлении, параллельном оси  $C_4$ ),  $\beta_{\perp}$  (в направлении, перпендикулярном  $C_4$ ) и объемной  $\Delta_v$  сжимаемостей соединения  $\text{Cu}(\text{NH}_4)_2\text{Br}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . Упругие параметры и сжимаемости приведены в таблице.

Результаты измерений и расчетов показывают, что анизотропия сжимаемости с понижением температуры уменьшается.

Полученное значение объемной сжимаемости  $\text{Cu}(\text{NH}_4)_2\text{Br}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  при температуре 77 К  $\Delta_v = 5.1 \cdot 10^{-2}$  ГПа<sup>-1</sup> близко к величине  $\Delta_v = 4 \cdot 10^{-2}$  ГПа<sup>-1</sup> для кристалла  $\text{CuK}_2\text{Cl}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , имеющего наименьшие параметры кристаллической решетки в ряду изоморфных соединений  $\text{CuM}_2\text{X}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . Значение объемной сжимаемости  $\text{CuK}_2\text{Cl}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  оценивалось по коэффициенту теплового расширения ( $9 \cdot 10^{-5}$  К<sup>-1</sup>), полученному из рентгеновских исследований в диапазоне температур 77—300 К [10].

Систематизация и анализ результатов исследований соединений  $\text{CuM}_2\text{X}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  при давлениях  $P < 1.0$  ГПа показывают, что изменение критической температуры  $\Delta T_c$  при всестороннем сжатии подчиняется определенной закономерности при изменении параметров решетки. Это

наглядно проявляется на зависимости барического коэффициента смещения  $T_c$  ( $\Delta T_c/\Delta P$ ) от объема решетки  $V$  (рис. 1). Характерные особенности полученной зависимости состоят в том, что 1)  $\Delta T_c$  растет с увеличением размеров элементарной ячейки; 2) с ростом объема решетки изменяется знак коэффициента  $\Delta T_c/\Delta P$ ; 3) при значении  $V \approx 465 \text{ \AA}^3$  ( $c \approx 8.1 \text{ \AA}$ )  $\Delta T_c/\Delta P \rightarrow 0$  (подобное поведение наблюдается у  $\text{CuRb}_2\text{Cl}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  при  $P < 0.3 \text{ ГПа}$ ).

Магнитная восприимчивость измерялась вдоль направления легкого намагничивания (001). Форма зависимости  $\chi(T)$  при давлениях до 2.2 ГПа практически не менялась. По смещению максимума температурной зависимости восприимчивости под давлением построена фазовая  $P-T$  диаграмма (рис. 2) для соединений  $\text{Cu}(\text{NH}_4)_2\text{Br}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{CuRb}_2\text{Br}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . Видно, что

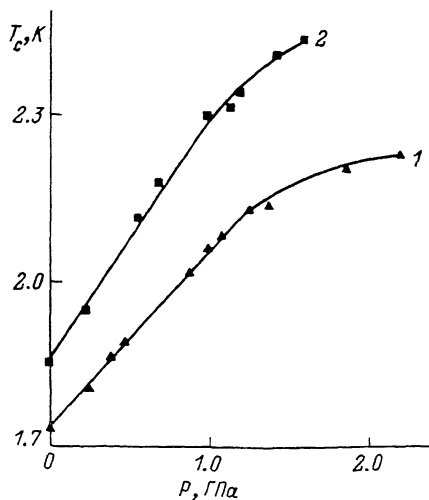
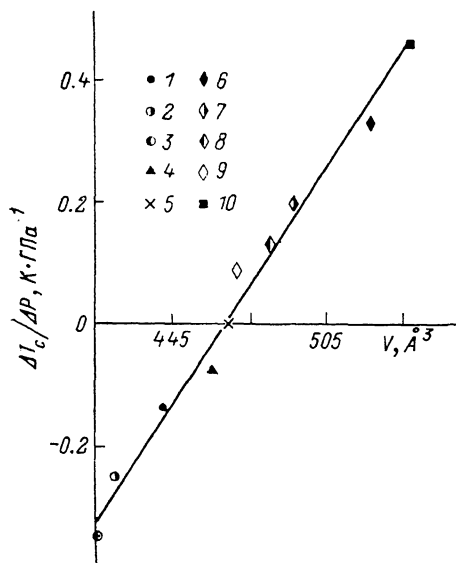


Рис. 1. Зависимость барического коэффициента смещения температуры фазового перехода  $\Delta T_c/\Delta P$  от объема решетки соединений  $\text{CuM}_2\text{X}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ .

Рис. 2. Магнитная фазовая  $P-T$  диаграмма соединений  $\text{Cu}(\text{NH}_4)_2\text{Br}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (1) и  $\text{CuRb}_2\text{Br}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (2).

1—3 —  $\text{CuK}_2\text{Cl}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , 4 —  $\text{Cu}(\text{NH}_4)_2\text{Cl}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ,  
5 —  $\text{CuRb}_2\text{Cl}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , 6—9 —  $\text{Cu}(\text{NH}_4)_2\text{Br}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ,  
10 —  $\text{CuRb}_2\text{Br}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ .  $P$ , ГПа: 1, 4—6, 10 — 0;  
2, 7 — 1.2; 3, 8 — 1.5; 9 — 2.0.

если при  $0 < P < 1.0 \text{ ГПа}$  зависимости практически линейные, то при  $P > 1.0 \text{ ГПа}$  ход зависимостей становится существенно нелинейным и с ростом давления производная  $dT_c/dP$  уменьшается. В отличие от соединений с хлором нелинейность в зависимости  $T_c(P)$  возникает при более высоких давлениях, так как параметр решетки с соединений  $\text{CuM}_2\text{Br}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  больше.

Так, если в  $\text{CuRb}_2\text{Cl}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  отклонение от возрастающего линейного участка в зависимости  $T_c(P)$  имеет место при 0.8 ГПа, то в  $\text{Cu}(\text{NH}_4)_2\text{Br}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  — при 1.2 ГПа, причем температура Кюри  $\text{CuRb}_2\text{Cl}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  при  $P > 1.5 \text{ ГПа}$  практически не изменяется. В  $\text{Cu}(\text{NH}_4)_2\text{Br}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  зависимость  $T_c(P)$  не выходит на насыщение даже при  $P \sim 2 \text{ ГПа}$ .

Анализ экспериментальных результатов показывает, что в соединениях  $\text{CuM}_2\text{X}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  проявляется общая закономерность изменения  $T_c$  при всестороннем сжатии независимо от знака параметра эффективного обмена  $\mathcal{J}_2$ .

В исследованных магнитодиэлектриках изменение характера фазовой  $P-T$  диаграммы обусловлено присутствием конкурирующих ферромагнитных  $\mathcal{J}_1$  и  $\mathcal{J}_2$  и антиферромагнитного  $\mathcal{J}_2$  вкладов в обменное взаимодействие ионов  $\text{Cu}^{2+}$ , причем относительная величина антиферромагнитного вклада с изменением межионных расстояний возрастает.

Согласно данным таблиц и предположению, что сжимаемости в исследуемой области давлений не зависят от давления (это, по-видимому, справедливо, так как отношение давления к объемному модулю  $P/K \ll 1$ , где  $K=1/\Delta_p$ ), рассчитанное расстояние между ионами  $\text{Cu}^{2+}$  вдоль оси  $C_4$  у  $\text{Cu}(\text{NH}_4)_2\text{Br}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{CuRb}_2\text{Br}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  при  $P > 1.5$  ГПа приближается к значению параметра  $c$  решетки для кристаллов с хлором, у которых увеличение  $J_{2c}$  и соответственно изменение характера зависимости  $T_c(P)$  проявляется даже при  $P \sim 1.0$  ГПа. Поэтому можно считать, что усиление антиферромагнитных взаимодействий  $J_{2c}$  в соединениях  $\text{CuM}_2\text{Br}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  при  $P > 1.2$  ГПа начинает сказываться на величине эффективного обмена и приводит к уменьшению значения производной  $dT_c/dP$  с ростом давления (рис. 1), а точнее, с уменьшением объема решетки.

Авторы выражают благодарность С. Н. Лукину за предоставление данных об упругих константах соединения.

#### Список литературы

- [1] Галкин А. А., Дьяконов В. П., Цинцадзе Г. А., Фита И. М. // ФТТ. 1976. Т. 18. № 6. С. 1569—1602.
- [2] Герман Б. Р., Дьяконов В. П., Маркович В. И., Цинцадзе Г. А. // ФТТ. 1983. Т. 25. № 12. С. 3703—3706.
- [3] Looyestijn W. J., Klaasen T. O., Poulis N. J. // Physica. 1980. V. 101B. N 1. P. 53—70.
- [4] Дьяконов В. П., Зароченцев Е. В., Левченко Г. Г., Маркович В. И. // ФТТ. 1987. Т. 29. № 10. С. 2894—2901.
- [5] Дьяконов В. П., Маркович В. И., Поляков П. И. // ФТТ. 1988. Т. 30. № 6. С. 1878—1880.
- [6] Берман И. В., Брандт Н. Б., Гинзбург Н. И. // ЖЭТФ. 1967. Т. 53. № 1. С. 123—133.
- [7] Иванова С. В., Лукин С. Н., Телета В. Т. // ФТТ. 1981. Т. 23. № 4. С. 1173—1175.
- [8] Brugger K. // J. Appl. Physics. 1965. V. 36. N 3. P. 759—768.
- [9] Най Дж. Физические свойства кристаллов. М.: Мир, 1967. С. 178.
- [10] Okuda T., Date M. J. // J. Phys. Soc. Jap. 1970. V. 28. N 2. P. 308—312.

Донецкий физико-технический  
институт АН УССР  
Донецк

Поступило в Редакцию  
20 февраля 1989 г.  
В окончательной редакции  
3 апреля 1989 г.

УДК 621.315.592.3 : 537.611.43

Физика твердого тела. том 31, в. 8, 1989  
Solid State Physics, vol. 31, N 8, 1989

## ИССЛЕДОВАНИЕ $\text{Hg}_{1-x-y}\text{Cd}_x\text{Mn}_y\text{Te}$ С ПОМОЩЬЮ ЭПР

В. Д. Прозоровский, И. Ю. Решидова, С. Ю. Паранчич,  
Л. Д. Паранчич

В работе сообщаются результаты исследования монокристаллов  $\text{Hg}_{1-x-y}\text{Cd}_x\text{Mn}_y\text{Te}$  с помощью ЭПР на ионах  $\text{Mn}^{2+}$  в области температур 1.55—250 К.

Исследовались образцы, выращенные методом Бриджмена, на частотах  $f_1=36.04$  и  $f_2=26.1$  ГГц. Образцы имели состав  $x_1=0.05$ ,  $y_1=0.02$  и  $x_2=0.1$ ,  $0.04 \leq y_2 \leq 0.14$ . В процессе исследования установлено, что на всех образцах, неотожженных и отожженных в парах Hg, наблюдалась единственная симметричная резонансная линия ЭПР, ширина  $\Delta H$  которой монотонно увеличивалась с возрастанием  $y$  во всем температурном диапазоне и с понижением температуры. Исключение составила область температур, в которой зависимость  $\Delta H$  от температуры имеет резонансно-подобный характер. Этой зависимостью характеризуются образцы, исследование которых проводилось сразу же после их роста. Величина  $g$ -фактора в обла-