

02

Спектроскопия высокого разрешения низкотемпературных фазовых переходов в метаборате меди CuB_2O_4

© А.Д. Молчанова¹, К.Н. Болдырев^{1,2}

¹ Институт спектроскопии РАН,
108840 Троицк, Москва, Россия

² Национальный исследовательский университет „Высшая школа экономики“,
101000 Москва, Россия

e-mail: kn.boldyrev@gmail.com

Поступила в редакцию 25.02.2019 г.

В окончательной редакции 25.02.2019 г.

Принята к публикации 15.03.2019 г.

Методом фурье-спектроскопии высокого разрешения исследован линейный магнитный дихроизм в кристаллографически изотропной плоскости ab тетрагонального монокристалла CuB_2O_4 при температурах 1.4–22 К. Обнаружены магнитные фазовые переходы при температурах $T < 2.0$ К и обсуждена их природа.

Ключевые слова: магнитный дихроизм, фурье-спектроскопия, магнитные фазовые переходы.

DOI: 10.21883/OS.2019.07.47928.114-19

Введение

Метаборат меди CuB_2O_4 демонстрирует богатый набор уникальных магнитных и оптических свойств. Исследования магнитной структуры и фазовой диаграммы метабората меди продолжаются уже около двадцати лет [1–6], тем не менее в этой области остается еще много неизученных вопросов.

CuB_2O_4 обладает двумя магнитными подсистемами, сформированными ионами меди Cu^{2+} в двух неэквивалентных кристаллографических позициях $4b$ и $8d$. При температуре Нееля $T_N = 21$ К магнитные моменты подсистемы $\text{Cu}(4b)$ упорядочиваются в соразмерную антиферромагнитную структуру, а при температуре $T^* \approx 10$ К происходит магнитный фазовый переход в несоразмерную геликоидальную структуру [2,5]. В антиферромагнитном состоянии CuB_2O_4 спины Cu^{2+} расположены в базовой плоскости ab и слегка отклонены от коллинеарного направления из-за взаимодействия Дзялошинского–Мория, что приводит к появлению слабого ферромагнитного момента [1]. Магнитная подсистема $\text{Cu}(8d)$ является квазиодномерной и не упорядочивается даже при самых низких температурах [5,6]. В недавней работе [7], посвященной высокопрецизионному спектроскопическому исследованию монокристалла метабората меди, ниже температуры Нееля для бесфононных линий (БФЛ или ZPL), относящихся к подсистеме $\text{Cu}(4b)$, был зарегистрирован линейный дихроизм (ЛД или LD) в кристаллографически изотропной ab -плоскости CuB_2O_4 . Было показано, что БФЛ при этом обладают дублетной структурой, связанной с магнитным давидовским расщеплением. С помощью метода линейного магнитного дихроизма (ЛМД или LMD) было обнаружено, что вблизи температуры T^* происходит не один, а два фазовых перехода

с температурами $T_1^* = 7.9$ К и $T_2^* = 8.5$ К в нулевом магнитном поле. Магнитная структура при этом имеет не простую геликоидальную, как предполагалось в [2,5], а эллиптическую структуру, где фазовые переходы T_1^* , T_2^* соответствуют последовательным переориентациям главной оси эллипса на 90° .

Однако до сих пор нет ясности по поводу магнитной структуры CuB_2O_4 при температурах ниже 2 К. В работе [2] на основании данных по упругому рассеянию нейтронов и мюонному спиновому резонансу сообщалось об изменении магнитной структуры CuB_2O_4 ниже 2 К. Эти результаты были подтверждены в работе [3] по результатам измерения магнитного резонанса, кроме того, в этой же работе был обнаружен фазовый переход при еще более низкой температуре.

Авторы [3] предположили, что при температурах $T < 2$ К реализуется каскад переходов между соизмеримыми состояниями типа „чертова лестница“.

Настоящая работа является продолжением исследования [7] CuB_2O_4 методом ЛМД при более низких температурах 1.4–4.2 К.

Методика эксперимента

Для измерений были использованы монокристаллы CuB_2O_4 толщиной $59 \mu\text{m}$, вырезанные перпендикулярно кристаллографической оси c (такие же, как и в работе [7]). Спектры поглощения в α -поляризации ($\mathbf{k} \parallel \mathbf{c}$, $\mathbf{E} \perp \mathbf{c}$, $\mathbf{H} \perp \mathbf{c}$) были зарегистрированы на спектрометре Bruker IFS 125 HR со спектральным разрешением 0.8 cm^{-1} . Для исследования ЛМД в падающий световой пучок ставился поляризатор (призма Глана–Тейлора). Образец помещался в оптический заливной гелиевый криостат (производства СКТБ Института физики АН УССР), где находился в парах гелия. Откачка паров

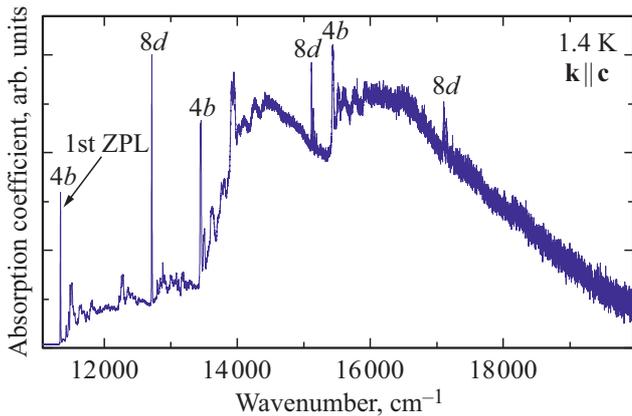


Рис. 1. Спектр поглощения CuB_2O_4 при температуре 1.4 К. Падающий свет поляризован в плоскости ab ($\mathbf{k} \parallel \mathbf{c}$). Стрелка указывает на БФЛ с частотой $11\,136\text{ cm}^{-1}$, на которой в настоящей работе наблюдался сигнал ЛД.

гелия обеспечивала достижение температур 1.4–4.2 К. Контроль температуры производился двумя методами:

- 1) измерением давления паров гелия на выходе из рабочей камеры криостата,
- 2) температурным контроллером Scientific Instruments 9700 с диодным кремниевым датчиком SI-410 и термсопротивлением Cernox.

Результаты и обсуждение

Спектр CuB_2O_4 в диапазоне частот $11\,000\text{--}20\,000\text{ cm}^{-1}$ при температуре 1.4 К приведен на рис. 1. Падающий свет поляризован в тетрагональной плоскости ab ($\mathbf{E} \perp \mathbf{c}$, $\mathbf{H} \perp \mathbf{c}$, $\mathbf{k} \parallel \mathbf{c}$). Можно увидеть, что на спектре наблюдаются все шесть БФЛ от ионов Cu^{2+} в обеих позициях. Как и в [7], ЛД наблюдался только на БФЛ, относящихся к подсистеме $4b$. В настоящей работе для измерения ЛД была выбрана первая БФЛ с частотой $\approx 11\,136\text{ cm}^{-1}$ (показана стрелочкой на рис. 1).

На рис. 2 приведены спектры линейного дихроизма в области нижней по частоте БФЛ, относящейся к подсистеме $\text{Cu}(4b)$, в диапазоне температур 1.5–4.2 К. Максимальное значение сигнала дихроизма наблюдается при $T = 4.2\text{ K}$, с понижением температуры величина ЛД монотонно уменьшается. При температуре $T_3 = 2.02\text{ K}$ ЛД меняет знак на противоположный и затем снова меняет знак при температуре $T_4 = 2.0\text{ K}$. При $T < 1.95\text{ K}$ сигнал ЛД продолжает уменьшаться и при $T_5 = 1.85\text{ K}$ полностью исчезает, причем появления сигнала ЛД не наблюдается вплоть до самых низких исследованных температур ($T = 1.4\text{ K}$).

Рис. 3 отображает температурную зависимость ЛД в области температур 1.4–21.0 К. Значения ЛД при температурах $T > 5\text{ K}$ приведены согласно результатам работы [7]. Можно предположить, что фазовые переходы при $T_3\text{--}T_5$ имеют такую же природу, как и переходы T_1^* ,

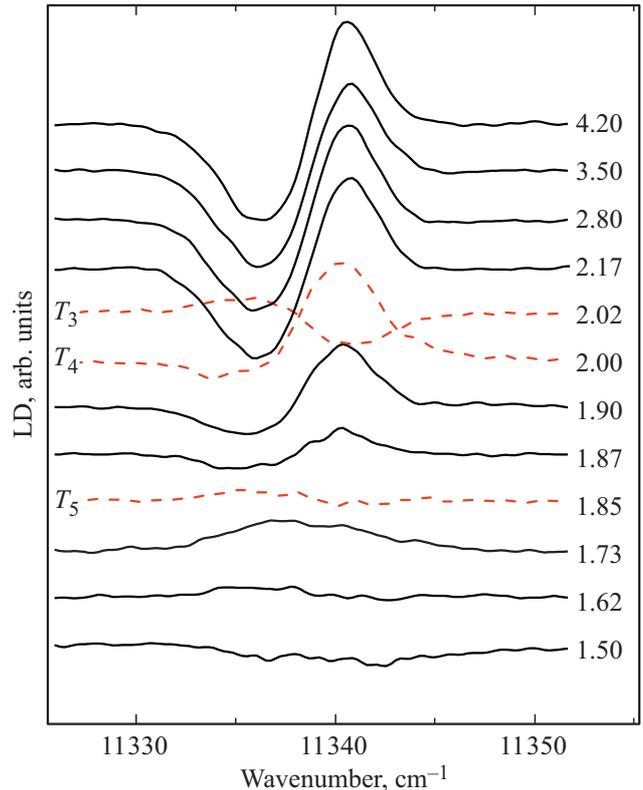


Рис. 2. Спектры ЛД CuB_2O_4 в области первой $4b$ БФЛ в температурном диапазоне 1.5–4.2 К (температуры в кельвинах каждого спектра приведены справа). Спектры последовательно смещены по оси ординат. Штриховыми линиями обозначены спектры при температурах фазовых переходов T_3 , T_4 и T_5 . Падающий свет поляризован перпендикулярно оси \mathbf{c} .

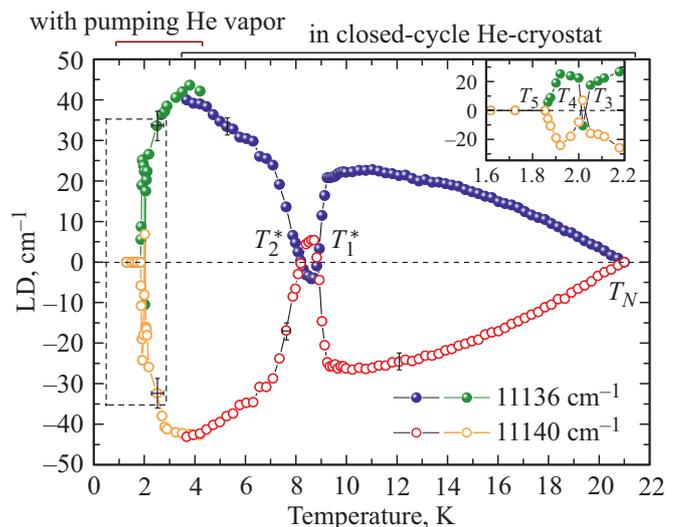


Рис. 3. Температурная зависимость сигнала дихроизма (LD) CuB_2O_4 для линий $11\,136\text{ cm}^{-1}$ (незаполненные кружки) и $11\,140\text{ cm}^{-1}$ (заполненные кружки) в области температур 1.4–21 К. Падающий свет поляризован перпендикулярно оси \mathbf{c} . Для температур 5–21 К данные приведены согласно [7]. Область, обведенная штрихами, показана на вставке с увеличением.

T_2^* [7]. При температурах T_3 и T_4 ЛД дважды меняет знак, что соответствует двум фазовым переходам в эллиптические магнитные структуры с последовательной переориентацией главной оси эллипса на 90° . Затем при T_5 осуществляется переход в простую геликоидальную структуру, сопровождающийся обращением сигнала ЛД в ноль. Стоит отметить, что результаты настоящей работы хорошо согласуются с исследованием [3], где два низкотемпературных ($T < 2$ К) перехода первого рода объяснялись авторами как переходы между двумя модулированными состояниями с различными волновыми векторами.

Для более детального исследования низкотемпературных фазовых переходов в метаборате меди образец CuB_2O_4 был помещен во внешнее магнитное поле ($\mathbf{H}_{\text{ext}} \perp \mathbf{c}$, $H_{\text{ext}} = 0.03, 0.05$ и 0.1 Т), создаваемое постоянными магнитами NdFeB. Было установлено, что даже при малом внешнем поле $H_{\text{ext}} = 0.03$ Т фазовые переходы в области температур > 2.0 К исчезают, и дихроизм наблюдается даже при температуре 1.4 К. Это говорит о чрезвычайной чувствительности низкотемпературных фазовых переходов на внешние магнитные поля.

Заключение

В настоящей работе продолжено исследование магнитных фазовых переходов в CuB_2O_4 методом оптической ЛМД-спектроскопии. При температурах $T < 2$ К зарегистрирован каскад магнитных фазовых переходов. Изменения знака сигнала ЛД при температурах T_3 и T_4 , по всей видимости, соответствуют переходам между двумя эллиптическими магнитными структурами, угол между главными осями эллипсов у которых составляет 90° , в то время как при температуре T_5 осуществляется переход в простую геликоидальную структуру, которая сохраняется вплоть до самой низкой из исследованных температур ($T = 1.4$ К).

Финансирование работы

Работа выполнена на Уникальной Научной Установке (УНУ) ИСАН „Мультифункциональная широкодиапазонная спектроскопия высокого разрешения“ (УНУ МШСВР ИСАН) при поддержке гранта РФФИ 18-32-00763 мол_а.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] *Petrakovskii G., Velikanov D., Vorotinov A., Balaev A., Sablina K., Amato A., Roessli B., Schefer J., Staub U.* // J. Magn. Magn. Mater. 1999. V. 205. N 1. P. 105. doi 10.1016/S0304-8853(99)00449-7
- [2] *Boehm M., Roessli B., Schefer J., Ouladdiaf B., Amato A., Baines C., Staub U., Petrakovskii G.A.* // Physica B — Condensed Matter. 2002. V. 318. N 4. P. 277. doi 10.1016/S0921-4526(02)00788-3
- [3] *Панкрац А.И., Петраковский Г.А., Попов М.А., Саблина К.А., Прозорова Л.А., Сосин С.С., Шимчак Г., Шимчак Р., Баран М.* // Письма в ЖЭТФ. 2003. Т. 78. № 9. С. 569. doi 10.1134/1.1641486
- [4] *Roessli B., Schefer J., Petrakovskii G.A., Ouladdiaf B., Boehm M., Staub U., Vorotinov A., Bezmaternikh L.* // Phys. Rev. Lett. 2001. V. 86. N 9. P. 1885. doi 10.1103/PhysRevLett.86.1885
- [5] *Boehm M., Roessli B., Schefer J., Wills A.S., Ouladdiaf B., Lelievre-Berna E., Staub U., Petrakovskii G.A.* // Phys. Rev. B. 2003. V. 68. N 2. P. 024405. doi 10.1103/Physrevb.68.024405
- [6] *Martynov S., Petrakovskii G.A., Roessli B.* // J. Magn. Magn. Mater. 2004. V. 269. N 1. P. 106. doi 10.1016/S0304-8853(03)00571-7
- [7] *Boldyrev K.N., Pisarev R.V., Bezmaternykh L.N., Popova M.N.* // Phys. Rev.Lett. 2015. V. 114. N 24. P. 247210. doi 10.1103/Physrevlett.114.247210