

2ТА-фононов $H_{\text{рез}} \sim 100$ кГц, для перехода с сохранением номера уровня Ландау $0^+ \rightarrow 0^-$ $H_{\text{рез}} \sim 400$ кГц. При использовании субмиллиметрового лазера с длиной волны 119 мкм резонансные поля гораздо меньше — соответственно ~ 1 и ~ 4 кГц.

В заключение о величине эффекта. Как показали экспериментальные исследования ЦДФР на коротковолновых акустических фононах (без переворота спина) [2], амплитуда двухфононных осцилляций оказывается того же порядка, что и однофононных на длинноволновых оптических фононах. Причин тому две: нелинейное поляризационное взаимодействие электрона с парой коротковолновых фононов немало; фазовый объем слабодисперсных коротковолновых фононов, актуальных в резонансах, велик. По этим же причинам можно надеяться, что величина КДФР того же порядка, что и КФР, исследованного экспериментально в [9]. Более точную оценку получить затруднительно, так как неизвестна константа взаимодействия электрона с коротковолновыми фононами.

Список литературы

- [1] Блох М. Д., Магарилл Л. И., Сапцов В. И., Скок Э. М. // ФТТ. 1986. Т. 28. № 5. С. 1470—1478.
- [2] Блох М. Д., Лешко О. М., Шерегий Е. М. // Письма в ЖЭТФ. 1988. Т. 48. № 4. С. 215—217.
- [3] Маргулис В. А., Куделькин Н. Н. // ЖЭТФ. 1980. Т. 78. № 4. С. 1523—1529.
- [4] Шека В. И. // ФТТ. 1964. Т. 6. № 10. С. 3099—3106.
- [5] Рашба Э. И., Шека В. И. // ФТТ. 1961. Т. 3. № 6. С. 1735—1749.
- [6] Левинсон И. Б., Рашба Э. И. // Письма в ЖЭТФ. 1974. Т. 20. № 1. С. 63—67.
- [7] Блох М. Д., Магарилл Л. И. // ФТТ. 1989. Т. 31. № 2. С. 7—11.
- [8] Mitra S. S., Massa N. E. Handbook on semiconductors / Ed. T. S. Moss. Amsterdam, N. Y., Oxford, 1982. V. 1.
- [9] Weiler W. H., Aggarwal R. L., Lax V. // Sol. St. Comm. 1974. V. 14. N 14. P. 299—302.

Институт физики полупроводников
СО АН СССР
Новосибирск

Поступило в Редакцию
28 ноября 1988 г.
В окончательной редакции
17 мая 1989 г.

СТРУКТУРНЫЙ ФАЗОВЫЙ ПЕРЕХОД В НЕСВЕРХПРОВОДЯЩЕЙ СИСТЕМЕ $\text{DyBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$

Н. А. Дорошенко, В. П. Дьяконов, Г. Г. Левченко,
В. И. Маркович, В. М. Свистунов, И. М. Фита

Для понимания природы и характера взаимодействий в ВТСП важны исследования не только самих ВТСП, но и близких к ним по кристаллической структуре и химическому составу соединений, не являющихся сверхпроводящими. Для сверхпроводящего соединения $\text{DyBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ ($\delta < 0.5$) таковым является несверхпроводящее соединение с кислородным индексом, близким к 6 ($\delta > 0.5$), имеющее тетрагональную структуру. Магнитные свойства $\text{DyBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ в области низких температур ($T < 4.2$ К) в обеих кристаллографических модификациях исследованы достаточно подробно [1-3]; при $T \approx 0.90$ К в этом соединении происходит антиферромагнитное упорядочение с легкой осью вдоль C , в магнитном поле оно проявляет метамгнитное поведение [4]. Момент Dy^{3+} остается ненасыщенным даже в полях ~ 100 кЭ в результате сильного расщепления

мультиплета основного состояния ${}^6\text{H}_{7/2}$ в кристаллическом поле; влияние кристаллического поля, как следует из данных по теплоемкости, приводит к тому, что основное состояние — дублет — отделен от первого возбужденного уровня энергией ~ 40 К.

В настоящей работе проведены измерения магнитной восприимчивости несверхпроводящего образца $\text{DyBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ ($\delta \sim 1$) в области температур $0.4\text{--}100$ К и магнитных полей $0 < H < 25$ кЭ. Для измерения магнитной восприимчивости применялся индукционный метод на переменном токе. Амплитуда модуляционного поля частотой $30\text{--}1000$ Гц изменялась в пределах $0.5\text{--}25$ Э. Постоянное магнитное поле и модулирующее поле создавались сверхпроводящими соленоидом и модуляционной катушкой и были направлены вдоль оси цилиндрического образца ($\varnothing \sim 2$ мм, $l \sim 6$ мм, $m \sim 0.15$ г). ВТСП-керамика состава $\text{DyBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ синтезировалась из Dy_2O_3 , CuO и $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$. Прессование образцов проводилось под давлением ~ 1 ГПа.

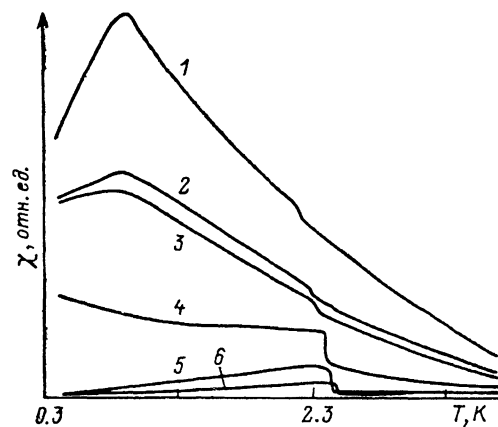


Рис. 1. Температурные зависимости изменения магнитной восприимчивости $\text{DyBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ ($\delta \sim 1$) в постоянных магнитных полях.

Частота модуляционного поля $f=300$ Гц. Значения восприимчивости приведены к нулю при 4.2 К. $H=0$ (1), 1.2 (2), 2.1 (3), 7.8 (4), 12 (5) и 18 кЭ (6).

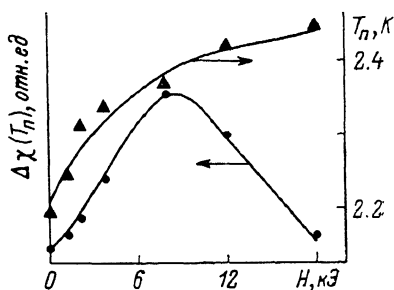


Рис. 2. Зависимости температуры перехода и величины скачка восприимчивости от магнитного поля.

Из измерений восприимчивости в интервале температур $20\text{--}100$ К получено значение парамагнитной температуры Кюри—Вейсса $\Theta = -(8 \pm 0.3)$ К, которое соответствует результатам работы [3]. Восприимчивость Dy-керамики отклоняется от закона Кюри—Вейсса ниже 20 К, что связано с влиянием кристаллического поля.

На рис. 1 представлены температурные зависимости магнитной восприимчивости $\chi(T)$ в постоянных магнитных полях при $T < 4$ К. Положение острого максимума зависимости $\chi(T)$ в нулевом магнитном поле при $T_N = 0.93 \pm 0.02$ К соответствует переходу в антиферромагнитное состояние и согласуется с данными работ [1–3]. Следует отметить, что в отличие от $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ [5] для $\text{DyBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ отсутствует заметная частотная зависимость магнитной восприимчивости при $T < T_N$. На зависимости $\chi(T)$ в нулевом магнитном поле (рис. 1) при $T_N \approx 2.2$ К обнаружен слабо выраженный скачок. На этом же рисунке представлен ряд зависимостей $\chi(T)_H$ в постоянных магнитных полях. Видны характерные особенности поведения обнаруженного скачка восприимчивости: с ростом магнитного поля он сдвигается в сторону высоких температур, величина скачка возрастает, и он становится более четко выраженным, достигая максимального значения при $H \sim 8$ кЭ, а затем начинает уменьшаться. В полях $H > 20$ кЭ скачки на зависимости $\chi(T)_H$ исчезают. Эти особенности поведения скачка восприимчивости — полевые зависимости его величины и температуры — представлены на рис. 2 (в области малых полей $H < 7$ кЭ скачок размыт по температуре, поэтому значение темпе-

ратуры определяли по положению его полувысоты). Необходимо отметить, что соединения $GdBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ не проявляет таких аномалий восприимчивости [5, 6].

Сравнение с известными литературными данными показывает, что подобное поведение магнитной восприимчивости в магнитном поле демонстрируют соединения диспрозия $DyAsO_4$ и $DyVO_4$; так, у $DyAsO_4$ едва заметный в нулевом поле скачок восприимчивости при $T_n = 11.1$ К с ростом поля вначале возрастает, затем уменьшается по величине, а температура его появления растет [7]. Эти соединения относятся к детально изученной группе веществ с довольно высокой симметрией кристаллической решетки — ванадаты и арсениды тербия, диспрозия и туллия с тетрагональной решеткой циркона, которые проявляют в области низких температур структурный фазовый переход (СФП), обусловленный кооперативным эффектом Ина—Теллера (КЭИТ). СФП является результатом взаимодействия вырожденного или псевдовырожденного электронного состояния с кристаллической решеткой через градиент электрического поля, создаваемого локальными искажениями в местах расположения редкоземельных ионов.

У соединений с диспрозием $DyVO_4$ ($T_n = 14.0$ К) и $DyAsO_4$ ($T_n = 11.1$ К) при СФП происходит понижение симметрии от тетрагональной к орторомбической [8]. Так же как и в случае $GdBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ кристаллы $GdVO_4$ не проявляют СФП, поскольку при замене Dy^{3+} на Gd^{3+} разрывается связь магнитных ионов с кристаллическим полем решетки и смещениями ионов [9]. Кроме того, важным представляется схожесть локального окружения иона Dy^{3+} в соединениях $DyVO_4$, $DyAsO_4$ и $DyBa_2Cu_3O_{7-\delta}$: у всех тетрагональная локальная симметрия, каждый ион диспрозия окружают восемь ионов кислорода, причем расстояния связей $Dy-O$ очень близки (так, у $DyBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ расстояния $Dy-O$ для четырех связей $d_1 = 2.38$ Å, для четырех других $d_2 = 2.43$ Å [10]; у $DyVO_4$ $d_1 = 2.29$, $d_2 = 2.41$ Å; у $DyAsO_4$ $d_1 = 2.33$, $d_2 = 2.42$ Å [11]).

Поскольку проведение рентгеновских и нейтронно-графических исследований соединения $DyBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ выше и ниже T_n с целью определения структурных изменений, возникающих при СФП, довольно затруднено при этих температурах ($T \sim 2$ К), в настоящий момент мы можем лишь предполагать, что обнаруженный нами скачок магнитной восприимчивости в $DyBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ обусловлен СФП и имеет ту же природу, что СФП в $DyVO_4$, $DyAsO_4$, и при этом фазовом переходе в $DyBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ происходит понижение симметрии от тетрагональной к орторомбической.

Авторы выражают благодарность А. М. Быкову, Б. Я. Сухаревскому за обсуждение работы и ценные замечания.

Список литературы

- [1] Oguro I., Tamegai T., Iye Y. // *Physica C*. 1987. V. 148B. P. 456—458.
- [2] Dunlap B. D., Slaski M., Hinks D. G., Soderholm L., Beno M., Zhang K., Segre C., Crabtree G. W., Kwok W. K., Malik S. K., Shuller I., Jorgensen J. D., Sungalla Z. // *J. Magn. Magn. Mat.* 1987. V. 68. P. L139—L144.
- [3] Hodges J. A., Imbert P., Marimon da Cunha J. B., Hammann J., Vincent E. // *Physica C*. 1988. V. 156. P. 143—156.
- [4] Дорошенко Н. А., Дьяконов В. П., Левченко Г. Г., Маркович В. И., Свиштунов В. М., Фита И. М. // Тез. докл. II Всес. семинара «Магнитные фазовые переходы и критические явления». Махачкала, 1989.
- [5] Дьяконов В. П., Левченко Г. Г., Маркович В. И., Свиштунов В. М., Таренков В. Ю., Фита И. М. // *Сверхпроводимость*. 1989. Т. 2. № 8. С. 74—81.
- [6] Van den Berg J., Van der Beek C. J., Kes P. H., Mydosh J. A. // *Sol. St. Comm.* 1987. V. 63. N 5. P. 699—703.
- [7] Hudson R. P., Mangum B. W. // *Physics Lett.* 1971. V. 36A. N 3. P. 157—158.
- [8] Gehring G. A., Gehring K. A. // *Rep. Prog. Phys.* 1975. V. 38. N 1. P. 1—89.
- [9] Bingham D., Morgan M. J., Cashion J. D. // *Sol. St. Comm.* 1982. V. 44. P. 517—520.
- [10] Fischer P., Kakurai K., Steiner M., Clausen K. N., Lebech B., Hulliger F., Omm H. R., Bruesch P., Unternahrer P. // *Physica C*. 1988. V. 152. P. 145—153.
- [11] Schafer W., Will G. // *J. Physics C*. 1971. V. 4. N 18. P. 3224—3233.