

УДК 537.611.45  
© 1991

## ВЛИЯНИЕ ВСЕСТОРОННЕГО ДАВЛЕНИЯ НА МЕЖСЛОЕВОЕ ОБМЕННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ И ПОЛЯ АНИЗОТРОПИИ КРИСТАЛЛА $(C_2H_5NH_3)_2CuCl_4$

*В. Н. Васюков*

Проведено исследование влияния всестороннего давления на спектр АФМР квадизмерного антиферромагнетика  $(C_2H_5NH_3)_2CuCl_4$ . В интервале давлений от нуля до 10 кбар и интервале частот СВЧ поля от нуля до 3 ГГц исследовано поведение ветвей спектра АФМР во всех существующих фазах. Получены зависимости параметров гамильтониана от давления.

Действие всестороннего давления на кристалл  $(C_2H_5NH_3)_2CuCl_4$  приводит к изменению межслоевого антиферромагнитного обменного взаимодействия и к изменению полей, характеризующих анизотропию магнитных свойств кристалла. Изменение каждого из этих параметров вносит вклад в изменение положений резонансных линий спектра АФМР.

В [1] исследовано влияние всестороннего давления на поведение «ферромагнитной» ветви спектра АФМР кристалла  $(C_2H_5NH_3)_2CuCl_4$ .

Для выделения вклада изменения межслоевого обменного взаимодействия и изменения каждого из полей анизотропии изучение поведения только одной ветви спектра недостаточно.

Для получения дополнительной информации в настоящей работе действие всестороннего давления на спектр АФМР кристалла  $(C_2H_5NH_3)_2CuCl_4$  изучено в широком диапазоне магнитных полей от нулевого значения до значений, превосходящих поле схлопывания магнитных подрешеток  $H_{fc}$ .

Измерение спектра АФМР проведено при  $T=4.2$  К на спектрометре, описанном в [1]. Исследуемый образец имел форму цилиндра диаметром 3 и высотой 0.5 мм. Магнитная составляющая СВЧ поля резонатора направлена вдоль оси  $c$  кристалла, параллельной оси цилиндра. Ориентация направления постоянного магнитного поля в плоскости  $(ab)$  осуществлялась по спектру АФМР. Давление в камере измерялось манганиновым датчиком, прокалиброванным при низких температурах по переходу в сверхпроводящее состояние олова [2].

На рис. 1 приведена диаграмма частотно-полевой зависимости спектра АФМР  $(C_2H_5NH_3)_2CuCl_4$  для  $P=2.3$  (светлые точки) и  $P=9.9$  кбар (темные точки). Сплошными линиями представлены теоретические зависимости ветвей спектра АФМР при направлении магнитного поля вдоль кристаллографической оси  $a$ . Штриховыми линиями обозначена ветвь спектра АФМР при направлении магнитного поля вдоль кристаллографической оси  $b$ . При расчете спектра использованы выражения для частот АФМР, приведенные в работе [1].

В окрестности поля спин-флип перехода  $H_{fa}$  в спектре АФМР имеется щель, о существовании которой более подробно сообщается в [3].

При  $H \parallel b$  интенсивность поглощения СВЧ мощности сильно зависит от величины магнитного поля. Так, например, в «парамагнитной» фазе, существующей при  $H \parallel b$ ,  $H > H_{fb}$  из-за слабой интенсивности не удалось экспериментально наблюдать резонансную линию «антиферромагнитной»

ветви. В «угловой» фазе  $H < H_{fb}$  антиферромагнитная ветвь наблюдается в ограниченном диапазоне магнитных полей, так как интенсивность резонансной линии быстро уменьшается до нуля при уменьшении частоты. Интенсивность резонансной линии «ферромагнитной» ветви слабо зависит от магнитного поля и наблюдается во всем интервале магнитных полей. С целью упрощения диаграммы на рис. 1 приведена только одна ветвь спектра, соответствующая  $\mathbf{H} \parallel \mathbf{b}$ , которая использована в работе для определения зависимости параметров гамильтониана от давления.

Качественный анализ результатов (рис. 1) позволяет сделать прежде всего вывод о сильной зависимости межслоевого антиферромагнитного взаимодействия. С ростом давления поле спин-флип перехода  $H_{fa}$  возрастает.

Другая особенность зависимости спектра АФМР от давления связана с поведением ферромагнитной ветви. Качественный анализ поведения

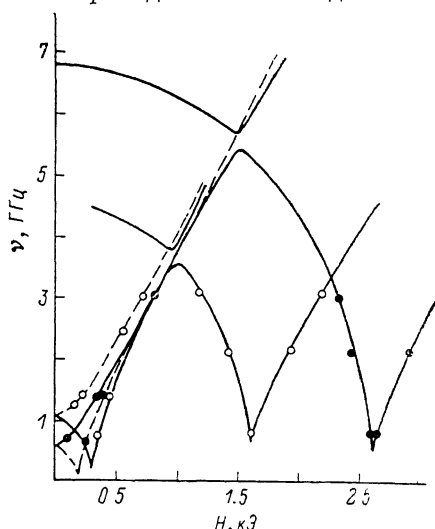


Рис. 1. Частотно-полевая зависимость спектра АФМР кристалла  $(\text{C}_2\text{H}_5\text{NH}_3)_2\text{CuCl}_4$ .

этой ветви детально проведен в [1]. На рис. 1 показано, что ферромагнитные ветви для  $\mathbf{H} \parallel \mathbf{a}$  и  $\mathbf{H} \parallel \mathbf{b}$  при  $P=9.9$  кбар «поменялись» местами с соответствующими ветвями при  $P=2.3$  кбар.

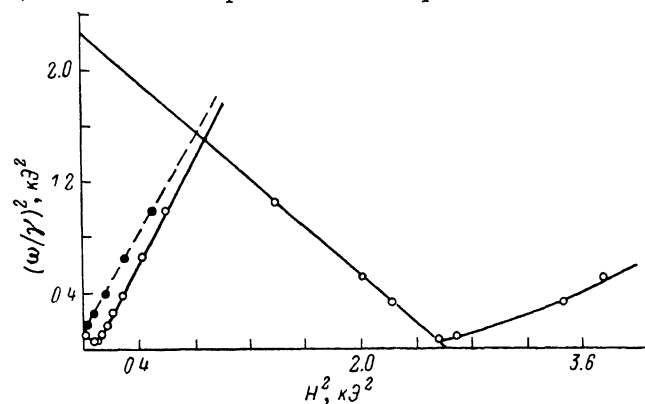


Рис. 2. Поведение ветвей частотно-полевой зависимости в координатах  $(\omega/\gamma)^2, H^2$ .

Для количественного описания зависимости спектра АФМР кристалла  $(\text{C}_2\text{H}_5\text{NH}_3)_2\text{CuCl}_4$  можно использовать гамильтониан, представленный выражением

$$\mathcal{H}/M_0V = -H_E + H'_E(m^2 - l^2) + a_y m_y^2 + a_x m_x^2 + b_y l_y^2 + b_x l_x^2 - 2H_d(m_y l_x + m_x l_y) - 2m\mathbf{H}, \quad (1)$$

$M_0 = g_x \mu_B S/V_0$  — намагниченность насыщения одной подрешетки;  $l = (\sigma_1 - \sigma_2)/2$ ;  $m = (\sigma_1 + \sigma_2)/2$ , где  $\sigma_1 = M_1/M_0$ ,  $\sigma_2 = M_2/M_0$  — относительные намагниченности подрешеток.

Действие всестороннего давления на кристалл не изменяет его симметрию. Поэтому в выражении (1) дополнительные, более низкосимметричные члены не появятся. Изменение магнитных свойств кристалла, вы-

званное внешним давлением, может быть описано зависимостью от давления параметров гамильтониана (1).

Для решения задачи восстановления параметров гамильтониана по резонансным частотам и резонансным полям спектра АФМР удобнее от координат  $\nu$ ,  $H$  перейти к координатам  $(\omega/\gamma)^2$ ,  $H^2$ .

В качестве примера на рис. 2 приведены ветви спектра АФМР  $(C_2H_5NH_3)_2CuCl_4$  для  $P=2.3$  кбар.

Согласно соотношению (3) работы [1], частоты спектра АФМР в фазовом состоянии, существующем при  $\mathbf{H} \parallel \mathbf{b}$  и  $H < H_{fb}$ , описываются линейными зависимостями в координатах  $(\omega/\gamma)^2$ ,  $H^2$ . В частности, «ферромагнитная ветвь» для  $\mathbf{H} \parallel \mathbf{b}$  (рис. 2, штриховая линия) в обозначениях [1] описывается соотношением

$$(\omega/\gamma)^2 = E_1^2 + H^2 H_1^2 / H_{fb}^2. \quad (2)$$

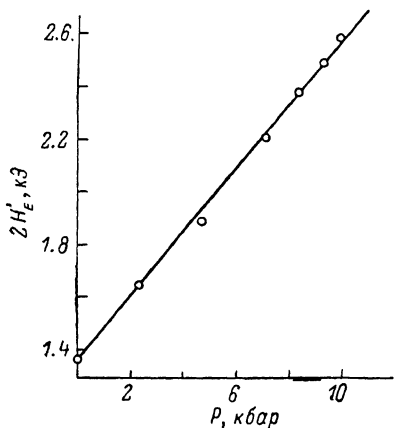


Рис. 3. Зависимость межслоевого обменного взаимодействия от величины всестороннего давления.

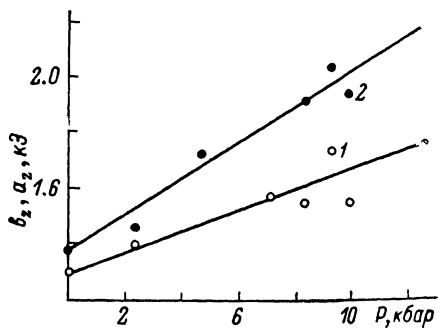


Рис. 4. Зависимость полей анизотропии  $a_x$  (1),  $b_x$  (2) от величины давления.

При  $\mathbf{H} \parallel \mathbf{a}$  частоты спектра в спин-флор фазе в координатах  $(\omega/\gamma)^2$ ,  $H^2$  линейными зависимостями точно не описываются. Выражение (4) работы [1], описывающее эти частоты, можно представить в форме

$$(\omega/\gamma)^2 = \{(\Omega_1/\gamma)^2 + (\Omega_2/\gamma)^2 \pm \{[(\Omega_2/\gamma)^2 - (\Omega_1/\gamma)^2]^2 + \delta H^2 (H_{fa}^2 - H^2)\}^{1/2}\} / 2, \quad (3)$$

где  $\Omega_1$ ,  $\Omega_2$  приближенно описывают ферромагнитную и антиферромагнитную ветви спектра АФМР в спин-флор фазе, существующей при  $\mathbf{H} \parallel \mathbf{a}$  и  $H_1 < H < H_{fa}$ , и равны

$$(\Omega_1/\gamma)^2 = H^2 (\epsilon_1^2 + H_2^2) / H_{fa}^2 - \epsilon_1^2, \quad (\Omega_2/\gamma)^2 = \epsilon_2^2 - H^2 \epsilon_2^2 / H_{fa}^2, \quad (4)$$

$\delta = 4 \{ \epsilon_2^2 (\epsilon_1^2 + H_2^2) - H_3^4 / H_{fa}^4 \}$ . Явный вид параметров  $\epsilon_1$ ,  $\epsilon_2$ ,  $H_1$ ,  $H_2$ ,  $E_1$ ,  $H_3$ ,  $H_{fa}$ ,  $H_{fb}$  приведен в [1].

В окрестности магнитного поля, при котором  $\Omega_1 = \Omega_2$  ветви АФМР интенсивно взаимодействуют, образуя окно прозрачности в спектре АФМР, подробно изученное в [4]. Величина расталкивания ветвей определяется параметром  $\delta$  и пропорциональна малому параметру  $(H_a/H_{fa})^2$ , который, согласно [5], при нормальном давлении приближенно равен  $5 \cdot 10^{-3}$ . Чем меньше отношение  $(H_a/H_{fa})^2$ , тем меньше область магнитных полей, в которой ветви спектра в спин-флор фазе отклоняются от линейных зависимостей, представленных в координатах  $(\omega/\gamma)^2$ ,  $H^2$  соотношением (4). В настоящей работе частота СВЧ поля меньше 3.1 ГГц. Для всех использованных давлений эта частота находится значительно ниже частоты, при которой  $\Omega_1 = \Omega_2$ , поэтому экспериментальные точки спектра АФМР спин-флор

фазы при  $H \parallel a$  хорошо описываются линейной зависимостью (рис. 2, сплошные линии).

Численные значения параметров  $E_1^2$ ,  $H_1^2/H_{fb}^2$ ,  $H_{fa}$ ,  $\epsilon_1^2$ ,  $\epsilon_2^2$ ,  $(\epsilon_1^2 + H_a^2)/H_{fa}^2$  для каждого значения всестороннего давления, действующего на кристалл, получены при помощи линейных зависимостей рис. 2. Каждый из этих параметров в свою очередь зависит от параметров, входящих в гамильтониан (1), согласно соотношениям, приведенным в [1]. Анализ полученных значений показывает, что изменение спектра АФМР кристалла  $(C_2H_5NH_3)_2CuCl_4$  в пределах точности измерений зависит в основном от изменений параметров  $H'_E$ ,  $a_x$ ,  $b_x$ ,  $b_y$ . Возможное изменение спектра АФМР, обусловленное изменением параметров  $H'_a$  и  $a_y - b_y$ , меньше точности измерений. Решая соответствующие уравнения относительно  $2H'_E$ ,  $a_x$ ,  $b_x$ ,  $b_y$  для каждого использованного давления, получили зависимости этих параметров от величины всестороннего давления, действующего на кристалл (рис. 3–5). В пределах погрешности измерений параметры линейно зависят от величины давления  $P$  (кбар),  $2H'_E = 1.36 + P \cdot 0.124$  кЭ,  $b_y = (63 - P \cdot 7.6) \cdot 10^{-3}$  кЭ,  $a_x = 1.3 + P \cdot 0.04$  кЭ,  $b_x = 1.38 + P \cdot 0.064$  кЭ.

С ростом давления все параметры возрастают, за исключением параметра  $b_y$ , который линейно уменьшается с ростом  $P$ , достигая нулевого значения при давлении  $P_C = 8.3$  кбар. Значение критического давления  $P_C$ , полученное линейной аппроксимацией  $b_y(P)$ , меньше значения, полученного в [1] в результате изучения угловой зависимости «ферромагнитной» ветви спектра АФМР  $(C_2H_5NH_3)_2CuCl_4$ . В [1] использована нелинейная аппроксимация всего лишь по четырем ближайшим экспериментальным точкам, что могло привести к погрешности аппроксимации, соизмеримой с погрешностью измерений резонансных полей и давления.

Как видно из рис. 3–5, наиболее сильно от давления зависит параметр  $H'_E$ , характеризующий межслоевое обменное взаимодействие. Наиболее слабо от давления зависит параметр  $b_y$ , характеризующий анизотропию магнитных свойств в плоскости  $(ab)$  кристалла  $(C_2H_5NH_3)_2CuCl_4$ . Однако именно слабое изменение параметра  $b_y$  приводит к качественному изменению в спектре АФМР и основном состоянии антиферромагнетика [1, 6].

Следует отметить, что сильное изменение величины щели в спектре АФМР в окрестности поля  $H_{fa}$  [3] не обнаружено. Поэтому для получения количественной информации о изменении этой щели под действием давления необходимо повышение точности измерения резонансных полей.

Автор благодарен В. Н. Криворучко за обсуждение работы и конструктивные замечания.

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Васюков В. Н., Телера В. Т. // ФТТ. 1990. Т. 32. № 1. С. 49–53.
- [2] Thompson J. D. // Rev. Sci. Instrum. 1984. V. 55. N 2. P. 231–234.
- [3] Васюков В. Н., Изотов А. И., Пашкевич Ю. Г., Телера В. Т. // ФТТ. 1989. Т. 31. № 6. С. 139–143.
- [4] Васюков В. Н., Журавлев А. В., Лукин С. Н., Пашкевич Ю. Г., Соболев В. Л., Телера В. Т. // ФТТ. 1984. Т. 26. № 5. С. 1297–1305.
- [5] Bloembergen P., Berkhout P. J., Franse J. J. M. // Int. J. Magnetism. 1973. V. 4. P. 219–238.
- [6] Богданов А. Н., Пузыря А. И., Телера В. Т., Шатский П. П. // ФНТ. 1987. Т. 13. № 1. С. 73–78.

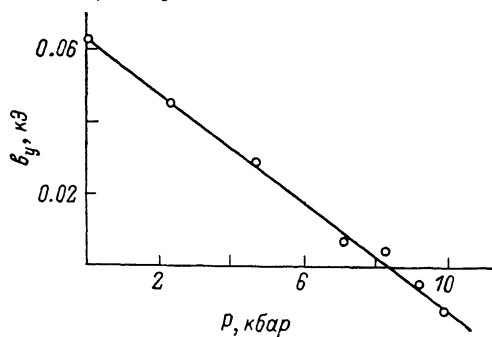


Рис. 5. Зависимость поля анизотропии  $b_y$  от величины давления.