

РАСЩЕПЛЕНИЕ СПЕКТРА НИЗКОЧАСТОТНОГО АНТИФЕРРОМАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА В NiCl_2

А. Ф. Лозенко, С. М. Рябченко

Низкочастотный антиферромагнитный резонанс (НЧ АФМР) в NiCl_2 исследовался в [1, 2], где было показано, что он может быть описан выражением:

$$\nu_{\text{нч}} = \frac{\gamma}{2\pi} \sqrt{H_0^2 + \Delta^2}, \quad (1)$$

где Δ – изотропная щель, по всей видимости магнитострикционной природы [3, 4]; $\Delta = 3 \text{ кэ}$ при $T = 4,2^\circ\text{К}$ [2].

Мы исследовали частотно-полевою зависимость НЧ АФМР в области частот 27 – 43 Гц. Образцы, в виде пластинок монокристалла размерами $1,5 \div 3 \times 2,5 \div 5 \times 0,1 \div 0,5 \text{ мм}^3$, размещались вблизи закорачивающего поршня в волноводе сечением $3,6 \times 7,2 \text{ мм}^2$. Волновод помещался в шахту, проходящую внутри сверхпроводящего соленоида. Внутри шахты был газообразный гелий, а на оконечной части волновода размещались термосопротивление, бифилярная обмотка печки и теплоизолирующие прокладки из тефлоновой пленки и шерстяных ниток. Данная конструкция позволяла менять температуру образца от 4,2 до $\sim 70^\circ\text{К}$. Магнитное поле было направлено вдоль оси волновода. Ось C_3 образцов была всегда перпендикулярна плоскости использованных пластинок. Различным образом закрепляя образцы мы могли проводить измерения при следующих условиях: 1) $H_0 \perp C_3$, $h_{\text{СВЧ}} \parallel C_3$; 2) $H_0 \perp C_3$, $h_{\text{СВЧ}} \perp C_3$, $H_0 \perp h_{\text{СВЧ}}$; 3) $h_{\text{СВЧ}} \parallel H_0 \perp C_3$. АФМР регистрировался по уменьшению отраженной СВЧ мощности и записывался на двухкоординатном самописце, на вход X которого подавалось напряжение с опорного сопротивления, через которое питался соленоид, и на вход Y – усиленный ток СВЧ детектора. Частота СВЧ мерилась резонансным волномером с точностью $\pm 2 \cdot 10^{-3}$, соленоид калибровался по сигналу ЭПР от свободного радикала – погрешность измерения поля $\pm 100 \text{ э}$. Сигналы НЧ АФМР регистрировались при всех трех способах расположения образцов, хотя, согласно [5] при третьем способе они не должны были наблюдаться. Возможно это связано с тем, что использовались образцы с линейными размерами сравнимыми с полуволной электромагнитного поля в волноводе, и поляризации СВЧ поля не была достаточно чистой.

При расположениях образцов типа 1) и 2) в области частот 37 – 43 Гц было обнаружено расщепление спектра НЧ АФМР вблизи частоты $\nu_{\text{кр}}$, которая оказалась отличающейся для разных образцов и для разного способа наблюдения (1) либо 2) для одного и того же образца. Различия в величинах $\nu_{\text{кр}}$ составляли не более 15% от средней величины $\nu_{\text{кр}}$. На рис. 1 и рис. 2 показана частотно-полевая зависимость положения максимумов линий поглощения для одного из образцов и семейство записей спектров на различных частотах в окрестности $\nu_{\text{кр}}$ (другого образца). Видно, что спектр состоит из линии описываемой уравнением (1) (отклонения положения центральной линии в об-

ласти пересечения могут быть вызваны кажущимся сдвигом из-за наложения линий; поэтому мы не придаем им значения) и из "крыльев" характерных для случая, когда имеется "расталкивание" уровней при взаимодействии. Линии, описывающие поведение "крыльев", в пределах точности эксперимента соответствуют решениям уравнения

$$\nu^4 - \nu^2(\nu_{нч}^2 + \nu_{кр}^2 + K^2) + \nu_{кр}^2 \nu_{нч}^2 = 0, \quad (2)$$

где K – константа связи равная расщеплению между "крыльями" при $\nu_{нч} = \nu_{кр}$. Для всех образцов, независимо от разброса $\nu_{кр}$, величина K оставалась постоянной и равной $2,1 \pm 0,05$ ГГц.

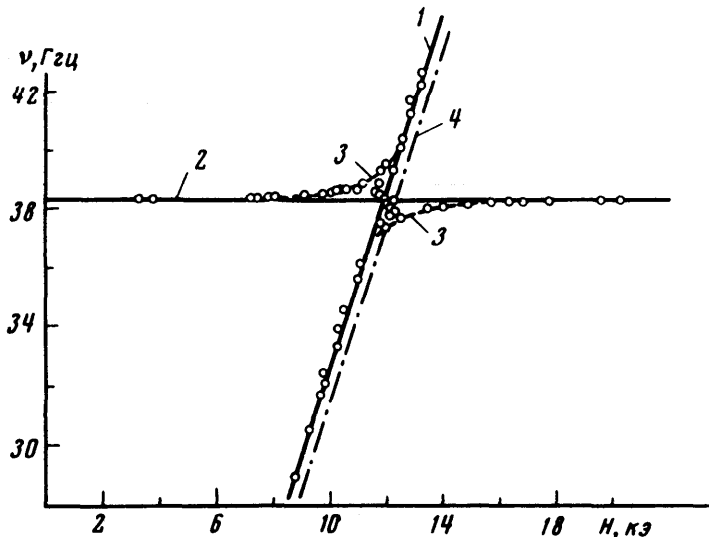


Рис. 1. Частотно-полевая зависимость НЧ АФМР в области аномального расщепления (для одного из образцов): 1 – НЧ АФМР (уравнение (1)); 2 – $\nu = \nu_{кр}$; 3 – "крылья"; 4 – $\nu = (\gamma/2\pi)H$.

При наклоне кристалла относительно оси волновода магнитное поле выходило из базисной плоскости и НЧ АФМР смешался в более высокие поля. Частота пересечения $\nu_{кр}$ при этом также смешалась вверх по частоте с уменьшением угла между осью волновода и осью C_3 кристалла $e(\Delta\nu/\Delta\theta) \approx -0,04$ ГГц/град. Обнаружено, что $\nu_{кр}$ зависит от размеров образца, увеличиваясь при уменьшении любого из линейных размеров, однако эта зависимость довольно слабая – при уменьшении одного из размеров на $\sim 30\%$ частота $\nu_{кр}$ росла на $\sim 10\%$. На ряде образцов, при сильном уменьшении линейных размеров расщепление спектра переставало наблюдаться в исследуемом интервале частот. На двух образцах (довольно низкого качества) наблюдалось по две области расщепления с различными $\nu_{кр}$. Один из образцов с толщиной $\sim 0,3$ мм был расколот по плоскости на две равные пластинки. На каждой из пластинок в отдельности расщепление на частотах < 43 ГГц не наблюдалось, в то время как две пластинки вместе, укрепленные в волноводе, давали спектр с расщеплением. Частота $\nu_{кр}$ увеличивалась от ~ 38 до ~ 43 ГГц с увеличением расстояния между пластинками от нуля до $2,5$ мм.

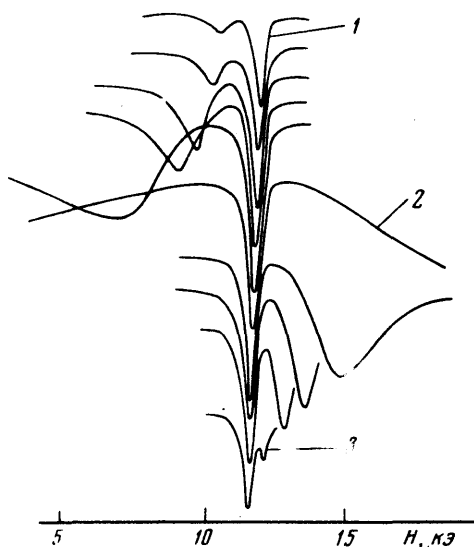


Рис. 2. Семейство записей спектров НЧ АФМР на различных частотах вблизи аномального расщепления (один из образцов): 1 - $\nu = 40,00$ ГГц ($> \nu_{кр}$); 2 - $\nu = 39,72$ ГГц ($= \nu_{кр}$); 3 - $\nu = 39,23$ ГГц ($< \nu_{кр}$)

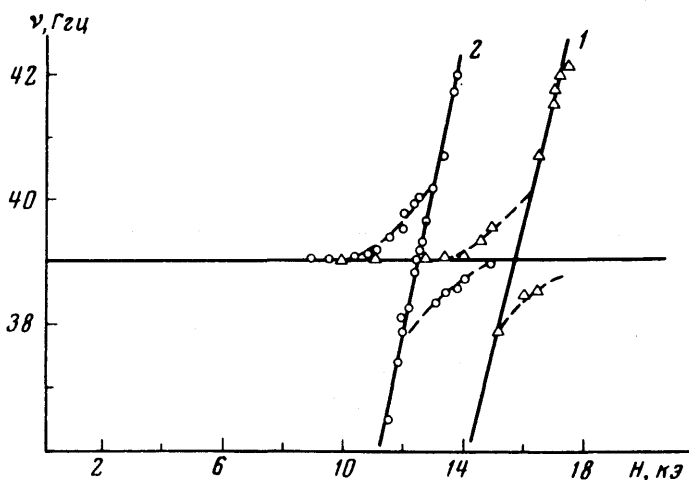


Рис. 3. Сохранение расщепления при $T > T_N$. Все спектры сняты при неизменном положении образца относительно оси волновода (направления H_0). Угол θ между C_3 и H_0 равен $\sim 50^\circ$. Δ - НЧ АФМР ($T = 4,2^\circ\text{К}$); \circ - ЭПР ($T \cong 70^\circ\text{К}$): 1 - $\nu_{НЧ} = (\gamma/2\pi) \sqrt{H_0^2 \sin^2 \theta + \Delta^2}$; 2 - $\nu_{ЭПР} = (\gamma/2\pi) H_0$.

Неожиданным оказалось отсутствие зависимости $\nu_{кр}$ и K от температуры при любой установке образца, причем оказалось, что расщепление спектра сохраняется с той же $\nu_{кр}$ и при переходе в парамагнитную область - рис. 3. Отсюда следует, что частота $\nu_{кр}$ не связана с ориентацией намагниченностей подрешеток, которая меняется при переходе через точку Нееля ($T_N = 49,6^\circ\text{К}$) от $M \perp H_0$ к $M \parallel H_0$. Это обстоятельство, а также то, что $\nu_{кр}(H) = \text{const}$ заставляет предположить,

что зависимость $\nu_{кр}$ от ориентации образца связана не с углом между H_0 и осью образца, а с углом между $h_{свч}$ и осью образца либо с влиянием расположения образца относительно стенок волновода, аналогично тому, что имеет место при ферромагнитном резонансе [6]. Эксперимент с расколотым образцом говорит в пользу второго предположения. В этом случае колебания частоты $\nu_{кр}$ должны сопровождаться колебаниями магнитного (электрического) момента образца.

Все известные нам из литературы случаи, когда наблюдалось расщепление спектра АФМР [7 – 10] не согласуются с независимостью K и $\nu_{кр}$ от температуры и от ориентации намагниченности подрешеток. Слабая размерная зависимость и большая величина $\nu_{кр}$ не согласуются с предположением о стоячих акустических волнах в образце. Уравнение (2), описывающее поведение "крыльев" типично для взаимодействия двух типов спиновых волн [7 – 9], однако высокочастотный АФМР в $NiCl_2$ [11] лежит в области частот в два раза больших и сильно зависит от температуры. За $\nu_{кр}$ могли бы быть ответственными поверхностные спиновые волны, однако вряд ли их спектр будет температурно независимым. Взаимодействием с примесями также противоречит размерный эффект и независимость от температуры K и $\nu_{кр}$. Для обычных оптических фононов частота $\nu_{кр} \sim 1,2 \text{ см}^{-1}$ слишком низка, а зависимость от размеров образца кажется странной.

Наличие в спектре одновременно нерасщепленной линии и "крыльев" заставляет предположить, что расщепленный спектр характерен для одной части образца, а нерасщепленный для другой, либо что колебания частоты $\nu_{кр}$ взаимодействуют с НЧ спиновыми волнами одной поляризации и не взаимодействуют с НЧ спиновыми волнами другой поляризации. Нам кажется, что второе предположение противоречит эксперименту с расколотым кристаллом. Наличие (в большинстве образцов) всего одной частоты $\nu_{кр}$ и ее воспроизводимость (с точностью до 5 – 7%) от кристалла к кристаллу указывают, что локальные колебания вблизи дефектов и неоднородностей не могут быть ответственными за $\nu_{кр}$. Можно предположить, что данные колебания являются поверхностными стоячими волнами типа колебаний мембраны или изгибных фононов [12 стр. 102, 167]. Для того чтобы они сопровождались электромагнитными колебаниями нужно, чтобы это были колебания оптические. Плоскости ионов металла и ионов хлора в $NiCl_2$ противоположно заряжены и противофазные изгибные колебания таких плоскостей могут обладать нужными свойствами такими как слабая зависимость частоты от размеров кристалла и низкая (по сравнению с обычными оптическими колебаниями) частота. К сожалению, спектр изгибных колебаний (а тем более поверхностных) в данном кристалле не изучен и нет также данных для проведения необходимых оценок в пользу высказанного предположения о природе колебаний частоты $\nu_{кр}$ взаимодействующих с НЧ спиновыми волнами.

Литература

- [1] М.О.Кострюкова, И.Л.Скворцова, ЖЭТФ, 47, 2069, 1964.
 - [2] М.О.Кострюкова, Л.М.Каширская. Письма в ЖЭТФ, 9, 400, 1969.
 - [3] А.С.Боровик-Романов, Е.Г.Рудашевский, ЖЭТФ, 47, 2095, 1964.
 - [4] Е.А.Туров, В.Г.Шавров, ФТТ, 7, 217, 1965.
 - [5] Е.А.Туров. Физические свойства магнитоупорядоченных кристаллов, М., изд. АН СССР, 1963.
 - [6] Б.Лакс, К.Баттон. Сверхвысокочастотные ферриты и ферримагнетики, М., изд. Мир, 1965, стр. 426.
 - [7] Л.А.Прозорова, А.С.Боровик-Романов. ЖЭТФ, 55, 1727, 1968.
 - [8] Л.В.Великов, С.В.Миронов, Е.Г.Рудашевский. ЖЭТФ, 57, 781, 1969.
 - [9] Б.С.Думеш, В.М.Егоров, В.Ф. Мещеряков. ЖЭТФ, 61, 320, 1971.
 - [10] I.Maartense, W.Searle. J.Appl. Phys., 42, 2349, 1971.
 - [11] А.Ф.Лозенко, В.И. Малиновский, С.М.Рябченко. ЖЭТФ, 60, 1387, 1971.
 - [12] А.М.Косевич. Основы механики кристаллической решетки, М., изд. Наука, 1972.
-