

ОБНАРУЖЕНИЕ ОБМЕННО-ОБУСЛОВЛЕННОГО ОРТОГОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ МАГНИТНОЙ ПРИМЕСИ

А.М.Балбашов, А.Г.Березин, Ю.В.Бобрышев,
П.Ю.Марчуков, И.В.Николаев, Е.Г.Рудашевский

При исследовании АФМР в YFeO_3 при 12 К в магнитных полях до 120 кЭ и интервале длин волн 4 – 0.75 мм экспериментально обнаружена примесная мода с необычной зависимостью частоты от магнитного поля, обусловленной ортогональным состоянием примеси, магнитный момент которой строго антипараллелен вектору ферромагнетизма.

Магнитные примеси в антиферромагнетиках исследовались достаточно широко и подробно (см., например, обзоры ^{1, 2}). Однако при исследовании АФМР в антиферромагнетике со слабым ферромагнетизмом нами обнаружена необычная зависимость частоты примесной моды от магнитного поля.

Эксперименты проводились на монокристалле ортоферрита иттрия YFeO_3 , выращенного методом зонной плавки с радиационным нагревом ³ из заготовок, полученных спеканием окиси иттрия Y_2O_3 и окиси железа Fe_2O_3 при температуре 1400 С. Окиси смешивались в соотношении 1,00 : 1,00 (в расчете на формульную единицу) с точностью $10^{-3}\%$. Суммарная массовая доля магнитных примесей в исходных компонентах, согласно паспортным данным, не превышала 10^{-4} для Fe_2O_3 и 10^{-6} для Y_2O_3 . Кроме того, был проведен рентгенфлюоресцентный анализ уже выращенного монокристалла на присутствие магнитных примесей, который показал следующее: примеси редких земель, кобальта и меди отсутствуют с точностью до 10^{-5} , массовая доля марганца не превышает $2 \cdot 10^{-5}$, что совпадает с паспортными данными. Для уменьшения количества дефектов и содержания в образце ионов Fe^{2+} и Fe^{4+} был проведен отжиг образца при температуре 1400°С в среде кислорода (20 атм) в течение 8 часов.

На этом образце были проведены исследования спектров магнитного резонанса при температуре 12 К в магнитном поле до 120 кЭ, направленном по оси с орторомбического кристалла. Экспериментально измерялась относительная интенсивность прошедшего через образец излучения заданной частоты (в интервале 75 – 400 ГГц) в зависимости от магнитного поля ⁴.

В данной геометрии эксперимента (вектор ферромагнетизма \mathbf{M} параллелен, а вектор антиферромагнетизма \mathbf{L} перпендикулярен магнитному полю, см. вставку на рис.) какой-либо спиновой переориентации, индуцированной магнитным полем, не происходит.

Результаты эксперимента приведены на рисунке. Помимо обычно наблюдаемого ⁵ АФМР, соответствующего квазиферромагнитной моде (восходящая ветвь) нами в магнитном поле обнаружена дополнительная линия поглощения (нисходящая ветвь), интенсивность которой была в 2 – 3 раза меньше, чем у линий АФМР, а ширина – во столько же раз больше. При температуре жидкого азота дополнительная линия не наблюдалась.

Несмотря на то, что исследовался высококачественный монокристалл (с содержанием примеси до 10^{-5}), мы полагаем, что наблюданная нисходящая ветвь является примесной модой, а довольно значительная интенсивность линий, по-видимому, может быть объяснена эффектом "обменного усиления", обнаруженным в ⁶.

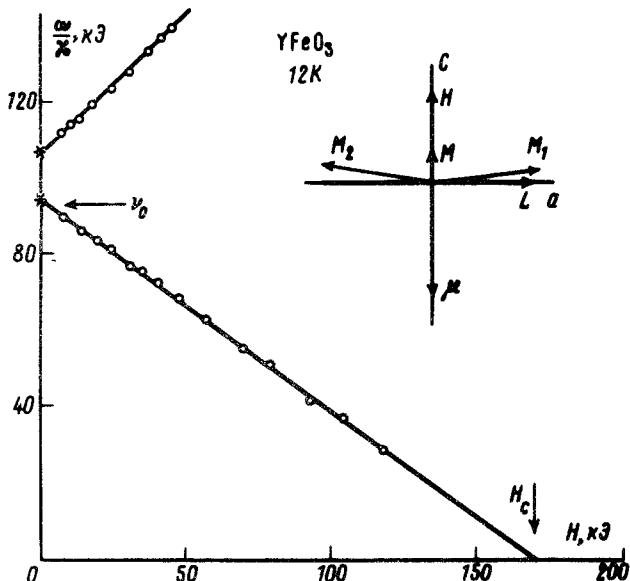
Зависимость примесной моды от магнитного поля с высокой точностью оказывается линейной и описывается формулой

$$\nu = \nu_0 \left(1 - \frac{H}{H_c}\right)$$

где $\nu_0 = 260 \pm 5$ ГГц, $H_c = 170 \pm 3$ кЭ.

Величина ν_0 соответствует приведенной в работе ⁷, где при исследовании АФМР в YFeO_3 в отсутствие магнитного поля при низких температурах была обнаружена неизвестная линия поглощения, которую авторы ⁷ также связали с магнитными примесями.

Особо подчернем, что в наших экспериментах обнаружена только нисходящая ветвь, а какая-либо дополнительная восходящая ветвь в данном диапазоне частот отсутствует. Последнее позволяет сделать вывод о том, что магнитные моменты примеси направлены антипараллельно магнитному полю и, следовательно, ортогональны осям антиферромагнетизма (см. вставку на рис.).



Зависимости резонансных частот от магнитного поля. На вставке показано взаимное расположение магнитного поля, намагниченностей подрешеток (M_1 и M_2) и примеси (μ). Звездочкой (*) обозначены данные работы ⁷.

Рассмотрим, какие позиции могут занимать примесные ионы в кристаллографической ячейке, чтобы их магнитные моменты были направлены противоположно внешнему полю. При этом будем считать, что в силу малой концентрации примеси ее магнитные моменты не связаны между собой обменным взаимодействием, а величина и симметрия поля, действующая на примесь, целиком определяются магнитными ионами Fe^{3+} . Ситуация, когда магнитные моменты примеси слабо связаны с магнитными моментами Fe^{3+} и их ориентация определяется только анизотропией, очевидно, не имеет места, поскольку в этом случае должна наблюдаться или одна восходящая ветвь (слабая анизотропия) или две ветви, нисходящая и восходящая, совпадающие при $H = 0$, что не наблюдается экспериментально. Примесные ионы могут либо замещать ионы железа в его позициях 4Fe , либо располагаться в междоузлиях, либо замещать ионы иттрия в редкоземельных позициях 4R . В позициях 4Fe магнитный момент примеси должен быть ориентирован параллельно или антипараллельно одной из Fe -подрешеток ("коллинеарная" примесь ⁸). В случае антипараллельного расположения у магнитного момента примеси действительно имеется составляющая, направленная против слабоферромагнитного момента. При приложении магнитного поля (вздесь $H \parallel c$ см. рисунок) эта составляющая может уменьшаться, однако при этом уменьшение частоты примесной моды будет незначительным, поскольку внешнее поле компенсирует только с-проекцию обменного поля. Вторая возможность — попадание примесных ионов в междоуз-

лия – представляется маловероятной, поскольку для формирования сравнительно узких и интенсивных линий такая примесь должна занимать регулярные и при этом достаточно симметричные позиции, в которых эффективное поле направлено по оси c .

Иная ситуация имеет место, если примесный ион занимает позиции 4R. В этих позициях симметрия допускает ориентацию обменного поля только в направлении оси c ⁹ и магнитный момент примеси может быть направлен как по, так и противоположно слабоферромагнитному моменту Fe-подсистемы. Только в последнем случае должно наблюдаться уменьшением частоты примесной моды с ростом поля. Особо отметим, что роль примесных ионов могут играть и ионы Fe^{3+} , попавшие на 4R-позиции. Существенно, что концентрация таких ионов может оказаться несравненно больше, нежели 10^{-5} , и тем не менее быть необнаружима методами химического и рентгеновского анализа. В результате в практически "беспримесном" (с концентрацией магнитных примесей до 10^{-5}) кристалле возникает примесная мода.

Таким образом, вероятной причиной, объясняющей наблюдаемые особенности примесной моды в YFeO_3 , нам представляется наличие в кристалле ионов Fe^{3+} , занимающих позиции 4R, с магнитным моментом, направленным против слабоферромагнитного момента (перпендикулярно оси антиферромагнетизма). Еще раз отметим, что ортогональное состояние примеси обусловлено направлением обменного поля в позиции 4R и, следовательно, имеет обменное происхождение, что принципиально отличается от ситуации, имеющей место в CoCO_3 с примесью Fe^{10} , где ортогональность примеси объясняется анизотропией иона Fe^{3+} (типа легкая ось) в матрице CoCO_3 (антиферромагнетик типа легкая плоскость)¹¹.

Следует отметить, что обычно исследуемые примесные ионы находятся либо в позиции изоморфного замещения, либо в междоузлиях. В нашем же случае примесь занимает регулярные позиции 4R, что, вообще говоря, позволяет из экспериментов по АФМР получать величину эффективного поля в месте расположения ионов R^{3+} .

Авторы глубоко признательны академику А.М.Прохорову за постоянное внимание к работе.

Литература

1. Ivanov M.A. et al. Phys. Reports 1987, 153, 209.
2. Eremenko V.V., Naumenko V.M. In "Spin Waves and Magnetic Excitations 2", 1988, Elsevier Science Publishers B.V., p. 259.
3. Балашов А.М. и др. Изв. АН СССР, сер. физ., 1971, 35, 1243.
4. Rudashevsky E.G. et al. IEEE Transactions on Microwave Theory and Technique, 1974, MMT-22, 1064.
5. Балашов А.М. и др. ЖЭТФ, 1987, 93, 302.
6. Прохоров А.С., Рудашевский Е.Г. Письма в ЖЭТФ, 1975, 22, 214.
7. Балашов А.М. и др. ФТТ, 1985, 27, 270.
8. Еременко В.В. и др. ЖЭТФ, 1982, 82, 813.
9. Белов К.П. и др. "Ориентационные переходы в редкоземельных магнетиках", М.: Наука, 1972.
10. Думеш Б.С. и др. ЖЭТФ, 1971, 61, 320.
11. Иванов М.А. и др. ФТТ, 1983, 25, 1644.

Институт общей физики
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
10 октября 1989 г.