

УДК 537.635

© 1990

МАГНИТНЫЙ РЕЗОНАНС НОВОГО ТИПА В КУБИЧЕСКОМ СИЛЬНОАНИЗОТРОПНОМ ФЕРРИМАГНЕТИКЕ

А. С. Лагутин, А. В. Дмитриев

Обнаружено резонансное поглощение СВЧ-излучения в миллиметровом диапазоне длин волн в тербий-иттриевых ферритах—гранатах при гелиевых температурах и в магнитных полях, больших 5 Тл. Наблюдаемые магнитные резонансы интерпретируются в модели инверсии энергетических уровней иона Tb^{3+} в магнитном поле.

Известно [1, 2], что в процессе намагничивания сильноанизотропных (изинговских) ферритов-гранатов наблюдаются скачки намагниченности, величина которых и их количество зависят как от концентрации редкоземельных ионов, так и от ориентации внешнего магнитного поля относительно кристаллографических осей.

В работе [2] было показано, что в соединении $Y_{3-x}Tb_xFe_5O_{12}$ для $x < 0.5$ в магнитных полях около 10 Тл имеет место изменение характера процесса намагничивания, что связывалось с образованием нового основного состояния ионов Tb^{3+} , значительно более анизотропного, чем исходное. Было предположено также, что обнаруженные в экспериментах аномалии намагниченности и дифференциальной магнитной восприимчивости в полях около 10 Тл также обусловлены индуцированной магнитным полем инверсией энергетических уровней редкоземельного иона.

Косвенное подтверждение возможности существования индуцированной магнитным полем инверсии уровней иона Tb^{3+} в феррите-гранате дают работы по исследованию ферромагнитного резонанса при низких температурах [3, 4], в которых обнаруженные в экспериментах аномалии ФМР интерпретируются в предположении наличия в спектре РЗ-иона близко расположенных к основному возбужденных уровней. Из измерений эффекта Фарадея [5] следует, что в полях порядка 10 Тл происходит резкое уменьшение ориентированного антипараллельно полю магнитного момента редкоземельной подрешетки, что также характерно для инверсии уровней.

В данной работе целью было получить прямое доказательство существования индуцированной внешним магнитным полем инверсии уровней иона Tb^{3+} в смешанных ферритах $Y_{3-x}Tb_xFe_5O_{12}$, для чего было проведено изучение магнитного резонанса в полосе частот от 35 до 96 ГГц при гелиевой температуре в полях до 40 Тл.

Идею эксперимента мы изложим, воспользовавшись анализом явления инверсии уровней, изложенным в [5]. В ферритах-гранатах с малым содержанием тербия ($x < 0.65$) на ион тербия действует наряду с внешним полем и эффективное обменное поле железной подсистемы ($\mu_0 H_{обм} = 28$ Тл [2]), причем эти поля антипараллельны друг другу. Если предположить, что при расщеплении мультиплета в кристаллическом поле два нижних уровня иона тербия — синглеты, причем возбужденный уровень имеет больший по величине g -фактор, то ниже температуры упорядочения железной подсистемы эффективное обменное поле на ионе тербия изменит расположение уровней и основным станет ранее возбужденный уровень

(рис. 1). Наложение внешнего магнитного поля, антипараллельного обменному, уменьшает эффективное поле, действующее на ион тербия, что и вызывает обратный переход при $H = H_{кр}$ в состояние с меньшим магнитным моментом. В таком случае вблизи $H_{кр}$ расстояние между уровнями будет велико, и энергии кванта СВЧ-излучения должно быть достаточно для индуцирования переходов между основным и возбужденным состояниями (эти процессы показаны черными стрелками на рис. 1). Другими словами, с обеих сторон вблизи $H_{кр}$ можно ожидать наличия резонансного поглощения СВЧ-излучения, причем с приближением к $H_{кр}$ частота такого резонанса должна стремиться к нулю. Аналогичное явление должно наблюдаться также и в полях, близких к $H_{обм}$, где тоже имеет место инверсия уровней иона тербия, сопровождающаяся скачкообразным перемагничиванием редкоземельных ионов [2].

Ниже сообщается о результатах исследования магнитного резонанса в миллиметровом диапазоне длин волн электромагнитного излучения

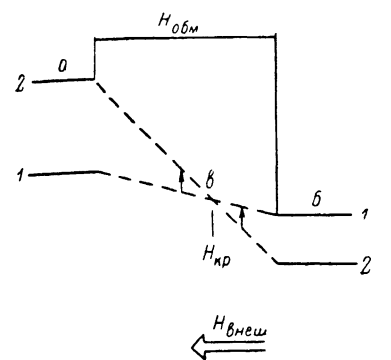


Рис. 1. Изменение основного состояния иона Tb^{3+} в феррите-гранате. а — квазидублет в кристаллическом поле, б — расщепление уровней в кристаллическом и обменном полях, в — инверсия основного состояния иона тербия.

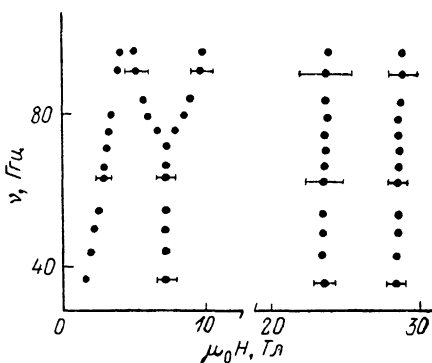


Рис. 2. Зависимости частот магнитного резонанса от магнитного поля в монокристалле $Y_{2.74}Tb_{0.26}Fe_5O_{12}$. $T = 4.2$ К, $H \parallel [110]$.

в монокристаллах $Y_{3-x}Tb_xFe_5O_{12}$ ($x=0.1$ и 0.26) при ориентации внешнего магнитного поля вдоль направления $[110]$. Измерения проводились в импульсных магнитных полях при $T=4.2$ К. Источниками СВЧ-излучения служили лампы обратной волны, а в качестве детектора применялся охлаждаемый жидким гелием кристалл $InSb$. Образцы имели форму куба со стороной около 2 мм.

Полевые зависимости частоты магнитного резонанса для кристалла с $x=0.26$ приведены на рис. 2. Точки соответствуют центру линий поглощения, а горизонтальные отрезки показывают полуширину этих линий. В слабых полях ($\mu_0 H < 5$ Тл) наблюдается линейная зависимость частоты резонанса от поля, причем экстраполяция к нулевому полю дает нулевую частоту. Аналогичные зависимости наблюдались и ранее в [3, 4], где интерпретировались как полевые зависимости ферримагнитного резонанса (ФМР), т. е. поглощения излучения при однородной прецессии магнитных моментов железа и тербия. По наклону зависимости $\nu(H)$ можно определить гиромагнитное отношение γ , которое отлично от известного γ для чистого иттриевого феррита-граната. Причиной тому наличие весьма сильного обменного взаимодействия между редкоземельной и железной подсистемами феррита-граната тербия, в силу чего в слабых полях их обе можно рассматривать как одно целое, тогда как в иттриевом гранате ФМР соответствует прецессии магнитных моментов только железной подсистемы.

Поглощение СВЧ-излучения в больших полях строго коррелирует с наблюдаемыми аномалиями дифференциальной магнитной восприимчивости (рис. 3), что дает возможность связать резонансное поглощение

в полях 7—8 Тл с инверсией исходных уровней иона тербия, а резонанс в полях, превышающих 20 Тл, — с процессами перемагничивания редкоземельной подсистемы.

Следует отметить, что обнаруженная картина резонанса в полях около 10 Тл соответствует предложенной выше модели явления: на высоких частотах имеется две линии поглощения, симметрично расположенные относительно $H_{\text{пр}}$, а с уменьшением частоты эти линии сближаются и в какой-то момент становится невозможно их разделить. Именно поэтому на рис. 2 при $\nu < 70$ ГГц показана лишь одна линия поглощения.

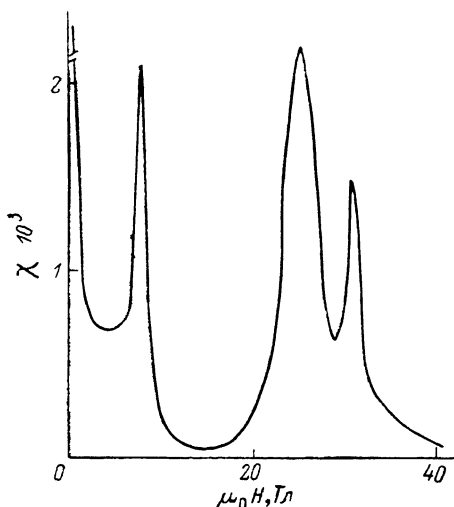


Рис. 3. Полевые зависимости дифференциальной магнитной восприимчивости монокристалла $Y_{2.74}Tb_{0.26}Fe_5O_{12}$. $T=4.2$ К, $H \parallel [110]$.

В больших полях нам не удалось увидеть хорошо расщепленные линии резонанса вблизи полей 25 и 31 Тл даже на самых высоких использованных в экспериментах частотах. Тем не менее значительное уширение

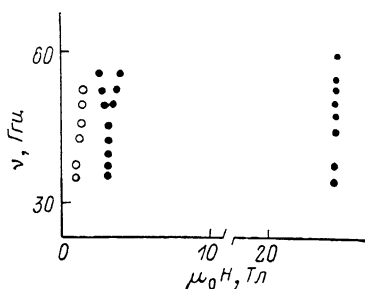


Рис. 4. Зависимости частот магнитного резонанса от магнитного поля в монокристалле $Y_{2.9}Tb_{0.1}Fe_5O_{12}$. $T=4.2$ К, $H \parallel [110]$.

Светлые кружки — ФМР.

линий с ростом частоты позволяет предположить, что и в этом случае качественное поведение резонансного поглощения будет подобно обнаруженному в полях около 10 Тл с той разницей, что расщепление линий будет возможно наблюдать на частотах более 100 ГГц.

Эксперименты, проведенные на монокристалле $Y_{2.9}Tb_{0.1}Fe_5O_{12}$ в тех же условиях, но только в полях до 30 Тл, дали аналогичные описанным выше результаты (рис. 4). В этом случае инверсия исходного состояния имеет место уже в поле примерно 3.5 Тл, а поля, в которых наблюдается резонанс, также коррелируют с особенностями дифференциальной магнитной восприимчивости (см. [2]).

Таким образом, наши исследования показали, что в сильноанизотропных кубических ферримагнетиках наряду с хорошо известным ферримагнитным резонансом существует целый ряд резонансов, которые наблюдаются на тех же частотах, что и ФМР, но в более сильных полях. Характерные особенности этих резонансов дают возможность связать их существование с наличием индуцированной полем инверсии уровней иона Tb^{3+} .

Список литературы

- [1] Демидов В. Г., Левитин Р. З., Попов Ю. Ф. // ФТТ. 1976. Т. 18. № 2. С. 596—598.
- [2] Лагутин А. С., Дмитриев А. В. // ФТТ. 1988. Т. 30. № 10. С. 2959—2965.
- [3] Dillon J. F., Walker L. R. // Phys. Rev. 1961. V. 124. N 5. P. 1401—1413.
- [4] Гуревич А. Г. // Магнитный резонанс в ферритах и антиферромагнетиках. М.: Наука, 1973.
- [5] Валиев У. В., Кринчик Г. С., Левитин Р. З., Мукамов К. М. // Письма в ЖЭТФ. 1979. Т. 29. № 4. С. 239—240.