

## РЕЗОНАНСНОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ СВЧ ИЗЛУЧЕНИЯ В ИЗИНГОВСКИХ СИСТЕМАХ. ГОЛЬМИЙ ИТТРИЕВЫЕ ФЕРРИТЫ-ГРАНАТЫ

*А.С.Лагутин, А.И.Попов<sup>1)</sup>*

*Институт атомной энергии им. И.В.Курчатова  
123182, Москва*

*<sup>1)</sup>Московский институт электронной техники  
103498, Москва*

Поступила в редакцию 14 июня 1991 г.

Изучены динамические свойства магнитной системы монокристалла  $\text{Ho}_{0,4}\text{Y}_{2,6}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  в сильных магнитных полях. Обнаружено, что наряду с линиями поглощения, связанными с известными из статических измерений магнитными фазовыми переходами, имеется целый ряд резонансов вдали от этих точек, причем как в полях меньших обменного, так и в значительно его превосходящих. Результаты интерпретированы на основе модели изинговского упорядочения ионов гольмия.

Проведенные недавно исследования магнитного резонанса в тербий-иттриевых <sup>1</sup> и гольмий-иттриевых <sup>2</sup> ферритах-гранатах показали наличие помимо ФМР нескольких линий поглощения в сильных магнитных полях в диапазоне частот 30 - 110 ГГц, причем их количество коррелирует с числом индуцированных внешним магнитным полем фазовых переходов. Это обстоятельство, а также полевые зависимости частот магнитного резонанса были интерпретированы в рамках модели пересечения уровней редкоземельного (РЗ) иона. Вместе с тем для гольмий-иттриевых гранатов было обнаружено существование и таких линий поглощения, которые никак не связаны с магнитоструктурными переходами.

Для получения дополнительной информации о спектрах поглощения РЗФГ в сильных полях и влияния на них как ориентации поля, так и концентрации РЗ ионов были проведены экспериментальные исследования магнитного резонанса в монокристаллах  $\text{Ho}_{0,4}\text{Y}_{2,6}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  в широком диапазоне частот (30 - 110 ГГц), полей (до 300 кЭ) и температур (от 4,2 до 160 К) при ориентации внешнего магнитного поля вдоль трех основных кристаллографических направлений: [100], [110] и [111]. В данной публикации изложены только результаты, полученные при гелиевой температуре при ориентации поля вдоль осей [111] и [100].

Методика экспериментов, проводившихся в импульсных магнитных полях, подробно описана в <sup>2</sup>. Объектами были монокристаллы, использованные ранее в <sup>3</sup> для статических магнитных измерений. Форма образцов - прямоугольные параллелепипеды с основанием  $1,5 \times 1,5$  мм и длиной 6 - 8 мм.

Зависимости частот магнитного резонанса от величины внешнего поля ( $\nu(H)$ ) при 4,2 К, построенные на основе анализа спектров поглощения, приведены на рис. 1 и рис. 2. Видно, что при различных ориентациях внешнего поля в полях, близких к полю обменного взаимодействия между редкоземельной и железной магнитными подсистемами кристалла ( $H_{обм} \cong 125$  кЭ) имеется разное число узких линий поглощения (группа А), центры которых точно соответствуют серединам магнитных фазовых переходов, обусловленных перемагничиванием РЗ ионов. Положение таких линий при любых частотах практически не зависит от поля, а для некоторых из них наблюдается увеличивающееся с

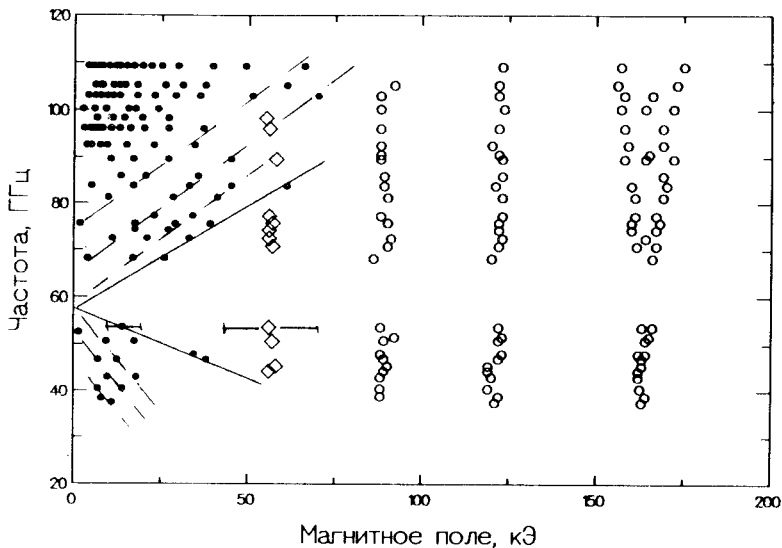


Рис. 1. Полевые зависимости частот, соответствующих максимумам резонансного поглощения СВЧ излучения в монокристалле  $\text{Ho}_{0,4}\text{Y}_{2,6}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  при  $H//[111]$  и  $T = 4,2\text{K}$ : незалитые точки - линии типа "А", ромбы - типа "Б"; залитые точки - типа "В". Горизонтальные отрезки указывают характерную полуширину резонансных линий

частотой расщепление на две (что было обнаружено в  $\text{Ho}_{0,2}\text{Y}_{2,8}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  ранее <sup>2</sup> или более очень узких ( $\Delta H \cong 1$  кЭ) линий. Подобное поведение  $\nu(H)$ , но без расщепления линий, характерно и для резонансов в полях как существенно меньших, так и гораздо больших, чем  $H_{обм}$ , причем в первом приближении они расположены симметрично относительно  $H_{обм}$  (группа Б). Ширина таких линий резко отлична от линий группы А ( $\Delta H \cong 25$  кЭ), а их положение по полю никак не связано с каким-либо изменением статических магнитных характеристик редкоземельного феррита-граната (РЗФГ). Третий тип линий поглощения ("В") обнаружен в полях, меньших 60 кЭ. Зависимости  $\nu(H)$  для резонансов этого типа удалось установить лишь для некоторых из них (линии "В1" - сплошные на рис.1 и 2 и линии "В2" - пунктир) потому, что описываемые эксперименты были направлены на исследование резонансных явлений в сильных полях, а поэтому и не было получено достаточно информации для определения резонансной картины в слабых полях. Найдено, что с возрастанием частоты для  $\nu > 90$  ГГц в полях менее 20 кЭ появляется множество дополнительных максимумов поглощения. Тем не менее удалось установить, что энергия возбуждений, соответствующих линиям "В1", одинаковы при  $H = 0$ , причем эта энергетическая щель аномально мала для РЗФГ ( $\Delta E \cong 57$  ГГц) и практически изотропна.

Известно, что в полях, где имеются линии А, возникает неустойчивость магнитной структуры кристалла, связанная с пересечением уровней РЗ ионов <sup>5</sup>. Поэтому логично связать резонансное поглощение СВЧ излучения вблизи  $H_{обм}$  с инверсией основного состояния РЗ иона, т.е. с изменением знака его проекции на легкую ось. Однако даже при максимальном сближении уровней нижнего дублета между ними имеется щель около  $5 \text{ см}^{-1}$ , обусловленная кристаллическим полем <sup>5</sup>. Поэтому резонансы при  $H \cong H_{обм}$  нельзя трактовать как переходы между состояниями иона гольмия, так как использованные

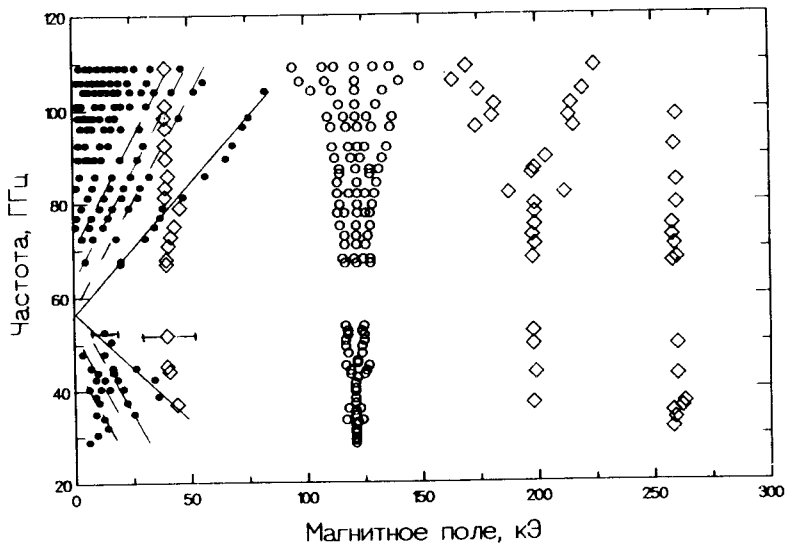


Рис. 2. Полевые зависимости частот, соответствующих максимумам резонансного поглощения СВЧ излучения в монокристалле  $\text{Ho}_{0,4}\text{Y}_{2,6}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  при  $H//[100]$  и  $T = 4,2\text{K}$ : незалитые точки - линии типа "А", ромбы - типа "Б", залитые точки - типа "В". Горизонтальные отрезки указывают характерную полуширину резонансных линий

в экспериментах частоты значительно меньше. Но процесс переворота магнитного момента РЗ иона ( $\vec{M}_k^R$ )  $k = 1...6$  сопровождается отклонением магнитного момента железной подсистемы ( $\vec{M}^{\text{Fe}}$ ) от направления поля. Тогда наблюдаемые максимумы поглощения логично связать с переходами между основным и метастабильным состояниями в железной подсистеме, существующими только вблизи фазовых переходов вместе с соответствующими переориентациями  $\vec{M}_k^R$ . Спектр таких переходов будет непрерывным, а зависимости  $\nu(H)$  будут подобны обнаруженным в экспериментах (см. рис. 1, группа А, крайняя правая линия). Отсутствие видимого расщепления других линий этой группы при увеличении частоты можно объяснить их значительной собственной шириной.

Наиболее интересным результатом экспериментов является обнаружение линий поглощения типа В, характер зависимостей  $\nu(H)$  для которых такой же как и для линий вблизи  $H_{\text{обм}}$ . Симметричное их расположение относительно  $H_{\text{обм}}$  говорит о том, что в их формировании участвуют ионы гольмия - ведь их состояния при этом, по сути, одинаковы. Однако расстояние между двумя нижними уровнями РЗ иона в таких полях велико и ни о каких индуцированных переходах между ними говорить нельзя. Вместе с тем поведение  $\nu(H)$  указывает (при сравнении с линиями группы А) на участие железной подсистемы кристалла в данном процессе. Учитывая отсутствие каких-либо резких или значительных изменений намагниченности в полях, где имеются линии поглощения типа В, можно предположить, что в этом случае происходит значительное размягчение исходной жесткой РЗ магнитной структуры, сопровождающееся увеличением поперечных составляющих  $\vec{M}_k^R$ , обусловленных взаимодействием основного квазидублета иона  $\text{Ho}^{3+}$  с вышележащими уровнями. При этом средняя величина проекции  $\vec{M}^{\text{Fe}}$  на направление поля также уменьшается из-за увеличения амплитуды его коле-

баний, однако разница  $\vec{M}^{\text{Fe}}$  и  $\sum \vec{M}_k^R$  остается неизменной. Таким образом, наличие линий типа *B* можно связать с образованием динамического состояния в магнитной системе РЗФГ, при котором возбуждаются такие типы колебаний, при которых не изменяется тип магнитной - структуры феррита-граната.

Зависимости  $\nu(H)$  для резонансов типа "B1" аналогичны обнаруженным ранее в  $\text{Ho}_{0,2}\text{Y}_{2,8}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ <sup>2</sup>, однако величина энергетической щели при  $H = 0$  в данном случае несколько больше (по сравнению с<sup>2</sup> изменилась только концентрация РЗ ионов). Это обстоятельство в сочетании с тем, что исчезновение такого поглощения в той области частот и полей, где происходит пересечение зависимостей  $\nu(H)$  для групп "A" и "B", однозначно указывает на то, что наличие линий *B* обусловлено колебаниями  $\vec{M}_k^R$ , которые, в свою очередь, вызывают колебания и в "мягкой" железной подсистеме. Можно предположить, что эти связанные колебания подобны возбуждаемым при АФМР в антиферромагнетиках<sup>4</sup>, в пользу чего говорит и характер полевых зависимостей линий "B1".

Информация для интерпретации других линий типа *B* пока не достаточно, поэтому можно высказать лишь несколько следующих предположений. Возможной причиной поглощения излучения в этом случае может быть возбуждение размерных резонансов в образце, о чем говорит эквидистантность по полю максимумов поглощения при сравнительно низких частотах и появление дополнительных линий поглощения между ними при увеличении частоты. Нельзя исключить также и того, что причиной существования большей части линий "B" является возбуждение колебаний типа АФМР, в пользу чего говорит аналогия между зависимостью  $\nu(H)$  для линий "B1" и зависимостями  $\nu(H)$  для резонансов группы "B2" (пунктир на рис. 1 - 2). Однако этот результат следует считать только предварительным, так как для окончательного установления поведения линий "B2" с полем необходимо провести более тщательные эксперименты с еще меньшим шагом по частоте в полях до 4 Тл.

---

1. Лагутин А.С., Дмитриев А.В. ФТТ, 1990, 32, 762.

2. Лагутин А.С. ЖЭТФ, 1991, 99, 336.

3. Силантьев В.И., Попов А.И., Левитин Р.З., Звездин А.К. ЖЭТФ, 1980, 78, 640.

4. Гуревич А.Г. Магнитный резонанс в ферритах и антиферромагнетиках, М., Наука, 1973.

5. Белов К.П., Звездин А.К., Кадомцева А.М., Левитин Р.З. Ориентационные переходы в редкоземельных магнетиках, М.: Наука, 1979.