

## ИЗЛУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН МАГНОНАМИ

*Б.Я.Котюжанский, Л.А.Прозорова, Л.Е.Свистов*

В слабом ферромагнетике  $\text{FeVO}_3$  возбуждались магноны методом параллельной накачки. Зарегистрировано излучение электромагнитных волн от этих магнонов с частотой  $\omega_p/2$  ( $\omega_p$  – частота накачки). Изучен спектральный состав излучения в зависимости от мощности накачки, температуры и магнитного поля.

Представляет интерес изучение спектра электромагнитного излучения параметрически возбужденными магнонами, так как это позволяет получить ценную информацию о механизме возбуждения и природе запорогового состояния. Такие исследования проводились на ферритах-гранатах <sup>1-4</sup>, однако во всех этих работах наблюдалось излучение от магнитостатических колебаний (с волновым числом  $k \lesssim 10^2$ ), энергия в которые поступает от магнонов с помощью двухмагنونного процесса рассеяния на дефектах и неоднородностях.

При этом спектральный состав излучения может отличаться от спектрального распределения параметрических магнонов <sup>2, 4</sup>. Вследствие закона сохранения импульса электромагнитное излучение параметрическими магнонами с  $k = 10^4 - 10^5 \text{ см}^{-1}$  должно быть существенно слабее, чем от магнитоэлектронных мод и до сих пор экспериментально не наблюдалось.

Мощность излучения магнонами из образца

$$I \propto k^{-2} N \omega_k^4 M_0 \Delta M, \quad (1)$$

где  $M_0$  — магнитный момент кристалла,  $\Delta M$  — его изменение, связанное с возбуждением одного магнона,  $N$  — число магнонов,  $\omega_k$  и  $k$  — частота и волновой вектор магнона.

В настоящей работе обнаружено электромагнитное излучение параметрически возбужденными магнонами в слабом ферромагнетике  $\text{FeVO}_3$  и исследован спектр излучения.

$\text{FeVO}_3$  — антиферромагнетик, обладающий анизотропией типа легкая плоскость. Низкочастотная ветвь спектра магнонов, о возбуждении которой будет идти речь, имеет вид <sup>5</sup>

$$\left(\frac{\epsilon_k}{\hbar\gamma}\right)^2 = \left(\frac{\omega_k}{\gamma}\right)^2 = H(H + H_D) + H_\Delta^2 + H_{\text{дип}}^2 + 36H_A^{(6)}H_E \cos 6\varphi + \alpha^2 k^2, \quad (2)$$

где  $\alpha$  — обменная константа,  $H$  — статическое магнитное поле,  $H_D$  — поле Дзялошинского,  $H_\Delta^2$  — параметр, определяемый сверхтонким и магнитоупругим взаимодействиями,  $H_{\text{дип}}^2$  — параметр, обусловленный полем магнонов <sup>6</sup>,  $\gamma$  — магнитомеханическое отношение,  $H_A^{(6)}$  — поле гексагональной анизотропии,  $H_E$  — обменное поле. Для таких веществ с сильным взаимодействием Дзялошинского величина

$$\Delta M = - \frac{\partial \epsilon_k}{\partial H} = - \frac{g\gamma(2H + H_D)}{2\omega_k} \mu_B \quad (3)$$

( $g$  — фактор спектроскопического расщепления,  $\mu_B$  — магнетон Бора) может оказаться существенно больше, чем у ферромагнетиков и мощность излучения будет достаточной для экспериментального наблюдения.

Параметры спектра магнонов в  $\text{FeVO}_3$ , а также процесс возбуждения в этом кристалле магнонов методом параллельной накачки описаны в <sup>7</sup>. Согласно существующим представлениям этим методом возбуждаются магноны с частотой  $\omega_k = \omega_p/2$ , где  $\omega_p$  — частота накачки. В описываемом эксперименте  $\omega_p/2\pi = 35,6 \text{ ГГц}$ . Магнетронный генератор накачки работал в непрерывном режиме. Резонатор спектрометра был настроен на частоту накачки. Исследуемый монокристаллический образец имел форму цилиндра с диаметром 2 мм и высотой 2 мм, торцы цилиндра совпадали с базисной плоскостью кристалла. Образец вклеивался в выходное отверстие связи резонатора. Выходной СВЧ сигнал разветвлялся и подавался по волноводу 1,5 см диапазона на детектор 8 мм диапазона и через волноводный фильтр, ослабляющий составляющую с частотой  $\omega_p$  на  $\sim 40 \text{ дБ}$ , на супергетеродинный приемник. Выходное напряжение с приемника и сигнал с СВЧ детектора 8 мм диапазона подавались на двухлучевой осциллограф. Полоса частот изучаемого излучения при не слишком большом превышении порога возбуждения магнонов оказалась уже полосы пропускания приемника (10 МГц), и поэтому его спектральный состав можно было изучать анализируя напряжение промежуточной частоты приемника (30 МГц). Для этой цели использовался спектр-анализатор С4-45 с полосой пропускания 3 кГц. Измерения проводились при температурах 1,2 — 4,2 К.

В результате проведенных экспериментов было установлено, что при любом малом превышении порога параметрического возбуждения магнонов наблюдается излучение в полосе частот  $\omega_p/2 \pm 2\pi \cdot 25 \text{ кГц}$ . Ширина полосы  $\Delta\omega$  в этом случае определялась, по-видимому, паразитной девиацией частоты магнетрона. При повышении мощности накачки спек-

тральная полоса излучения расширилась. Мощность излучения зависела от времени случайным образом: осциллограмма выходного сигнала приемника имела вид всплесков с характерной длительностью  $\tau = \Delta\omega^{-1}$ . Кроме того, симметрично относительно этой полосы в спектре излучения появлялись два спутника, отстоящие от нее на 0,9 МГц. Их ширина тоже увеличивалась с увеличением мощности накачки. Частота 0,9 МГц соответствует частоте одной из собственных мод упругих колебаний образца. Появление спутников согласуется с результатами работы <sup>7</sup>, согласно которым в результате распада параметрических магнонов генерируются упругие колебания.

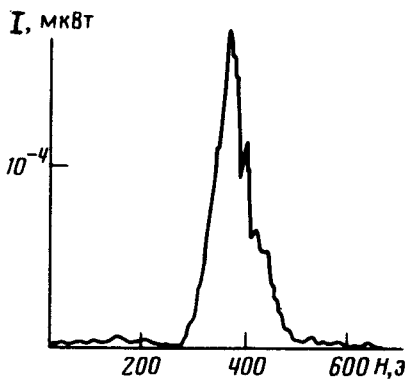


Рис. 1

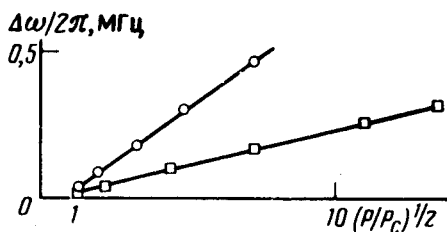


Рис. 2

Рис. 1. Зависимость мощности излучения на входе приемника от магнитного поля  $H$ .  $P/P_c \sim 10$  дБ,  $T = 1,2$  К

Рис. 2. Зависимости спектральной ширины излучения, измеренной на уровне 0,1 по мощности от  $(P/P_c)^{1/2}$ ;  $\square$  —  $T = 1,2$  К,  $\circ$  —  $T = 4,2$  К,  $H = 380$  Э

Излучение наблюдалось во всем интервале магнитного поля (от 0 до  $\sim 500$  Э), где происходило поглощение мощности накачки, соответствующее возбуждению магнонов. На рис. 1 приведена зависимость мощности излучения от магнитного поля при постоянной мощности накачки, превышающей пороговую мощность возбуждения  $P_c$  приблизительно в 10 раз. В некоторой области полей, ширина которой близка к ширине полосы магнитоэластических мод ( $4\pi M_S = 225$  Гс,  $M_S$  — спонтанная намагниченность) интенсивность излучения резко возрастает. Диапазон изменения интенсивности излучения составлял  $\sim 20$  дБ. Отсюда следует, что наблюдается излучение не только от магнитоэластических колебаний, но и непосредственно от параметрических магнонов. Спектральные ширины  $\Delta\omega$  этих излучений близки по величине и одинаковым образом зависят от мощности накачки  $P$ . На рис. 2 приведена зависимость  $\Delta\omega$  от  $(P/P_c)^{1/2}$  в поле  $H = 380$  Э, где излучение максимально. Отметим, что параметр релаксации магнонов  $\Delta\omega_k$ , определенный по порогу параметрического возбуждения составляет  $\sim 2\pi \cdot 1$  МГц при  $T = 1,2$  К <sup>7</sup>.

Поглощение мощности накачки при превышении пороговой мощности возникает скачком <sup>7</sup>. В поле  $H$ , соответствующем максимуму излучения оно составляло  $\sim 10$  мВт. При этом мощность излучения с частотой  $\omega_p/2$  на входе приемника была  $10^{-10}$  Вт.

Строгая теория, описывающая спектральный состав параметрически возбужденных магнонов в антиферромагнетиках, в настоящее время отсутствует. Тем не менее, наблюдаемая значительная ширина спектра излучения не согласуется с существующими представлениями о спектральном составе системы параметрических магнонов <sup>4</sup>.

Авторы благодарны А.С.Боровику-Романову за интерес к работе, А.И.Смирнову за обсуждение результатов и Л.Н.Безматерных за предоставление монокристаллов  $FeVO_3$ .

## Литература

1. *Peressini E.R., Hartwick T.S., Weiss M.T.* JAP, 1962, 33, 3292.
2. *Кирюхин Н.Н., Моносов Я.А.* ФТТ, 1971, 13, 1944.
3. *Кутовой Н.Г., Мелков Г.А.* ФТТ, 1975, 17, 958.
4. *Круценко И.В., Львов В.С., Мелков Г.А.* ЖЭТФ, 1978, 75, 1114.
5. *Боровик-Романов А.С.* ЖЭТФ, 1958, 36, 766.
6. *Ожогин В.И.* ЖЭТФ, 1965, 48, 1307.
7. *Котюжанский Б.Я., Прозорова Л.А.* ЖЭТФ, 1981, 81, 1913.

Институт физических проблем  
Академии наук СССР

Институт кристаллографии  
Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
13 мая 1983 г.