

## Литература

- [1] A.I.De Maria, C.M.Forrer, C.E.Danielson, Appl. Phys.Lett., 8, 22, 1966
  - [2] A.Iariv. J. Appl. Phys., 36, 388, 1965
  - [3] D.H.Auston. IEEE, IQE-4, 420, 1968.
  - [4] P.W.Smith. Appl. Phys. Lett., 13, 235, 1968
  - [5] А.Ф.Сучков, Труды ФИАН, 43, 161, 1968.
  - [6] Л.А.Вайнштейн. ЖЭТФ, 44, 1050, 1963.
  - [7] Н.Г.Басов. Э.М.Беленов, В.С.Летохов. ЖТФ, 35, 1996, 1965
  - [8] H.Statz, C.L.Tang. J.Appl. Phys., 36, 3923, 1965
  - [9] R.E.McClure. Appl. Phys. Lett., 7, 148, 1965
- 

Письма в ЖЭТФ, том 10, стр. 316 - 320

5 октября 1969 г.

### ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ СПИНОВЫХ ВОЛН

#### В АНТИФЕРРОМАГНИТНОМ $CsMnF_3$

*Л.А.Прозорова, А.С.Боровик-Романов*

В статье описываются результаты наблюдения возбуждения электронных спиновых волн в антиферромагнетике при параллельной ориентации статического и СВЧ магнитных полей.

В качестве объекта исследования был выбран  $CsMnF_3$ . Низкочастотная ветвь спектра АФМР в  $CsMnF_3$  описывается формулой [1, 2]

$$(\nu/\gamma)^2 = H^2 + 2H_E H_{AT} \cdot \quad (1)$$

Второй член в этой формуле обусловлен сверхтонким взаимодействием. По данным Ли, Портиса и Витта [1]  $H_E = 350$  кэ,  $H_{AT} = 9,15/T$  э

Мы изучали зависимость поглощения СВЧ-мощности в образце от величины внешнего магнитного поля. Исследования велись на частоте 9,43 Гц с импульсным источником ( $\tau = 1$  мксек) и на частоте 36 Гц с непрерывным источником. Образец помещался в высокочастотный резонатор так, чтобы статическое  $-H$  и СВЧ  $-h$  магнитные поля лежали в базисной плоскости кристалла.

Было обнаружено, что при  $h \parallel H$  начиная с некоторой мощности СВЧ в образце возникает поглощение в полях ниже определенного значения  $H_1$ . Величина этого поля  $H_1$  в пределах точности измерений не

зависит от мощности. На рис. 1, а и 1, б приведено несколько кривых, характеризующих наблюдаемое поглощение при различных уровнях

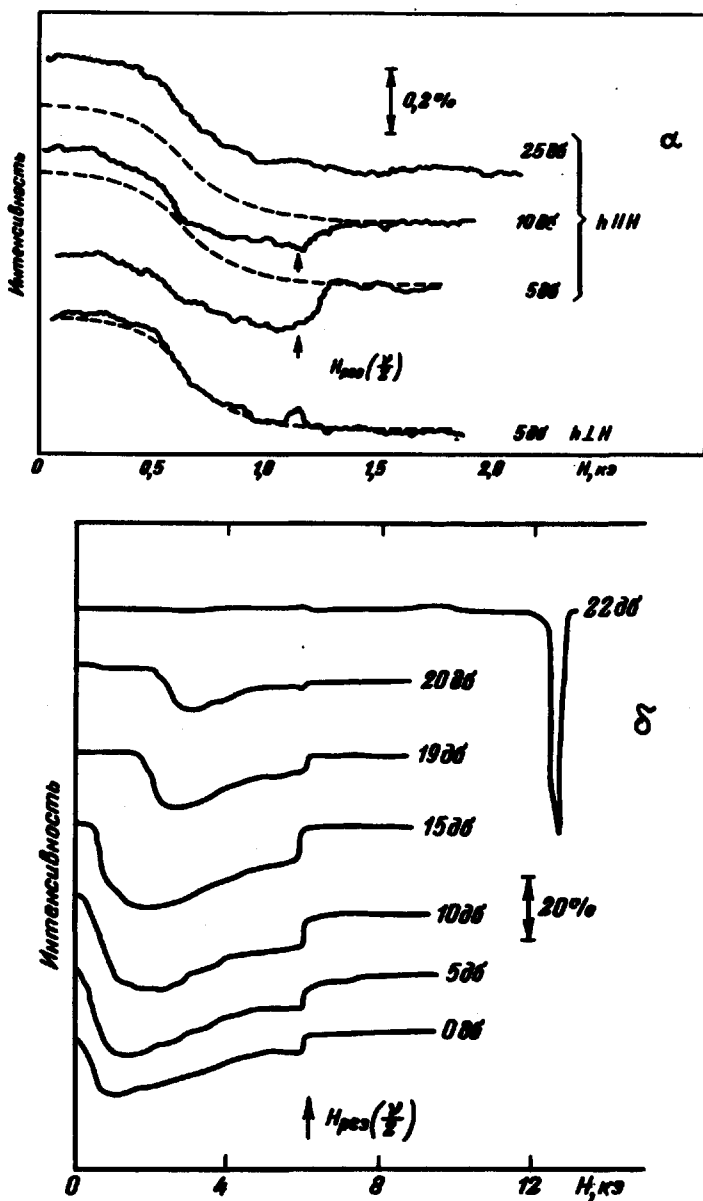


Рис. 1. Зависимость интенсивности прошедшей СВЧ мощности. Цифры справа от кривых – показания регулирующего аттенюатора. При нуле децибел СВЧ-поле в образце равно  $h_{\text{max}}$ : а -  $\nu_1 = 9,43 \text{ Гц}$ ,  $T = 4,2^\circ\text{К}$ ,  $h_{\text{max}} \sim 30 \text{ э}$ ; пунктирная кривая – кривая, соответствующая мощности 25 дБ и  $h \parallel H$   
б -  $\nu_2 = 36 \text{ Гц}$ ,  $T = 2,0^\circ\text{К}$ ,  $h_{\text{max}} \sim 10 \text{ э}$ .

мощности. Нижняя кривая на рис. 1, а снята при большой мощности, но в отличие от остальных при  $h \perp H$ . Наблюдаемый острый пик погло-

шения при значении магнитного поля, соответствующем обычному АФМР в соответствии с формулой (1) можно объяснить недостаточно строгой параллельностью полей.

При измерениях на частоте  $9,4 \text{ Гц}$  поглощение очень мало – практически одинаково при всех полях меньших  $H_1$  – и все время увеличивается с увеличением мощности. На частоте  $36 \text{ Гц}$  поглощение наблюдается гораздо лучше. Из рис. 1,б видно, что при малом превышении мощности над порогом оно наблюдается не при всех полях меньших  $H_1$ . С увеличением мощности область полей расширяется. При поле  $H_1$  поглощение исчезает скачком. Для фиксированного значения

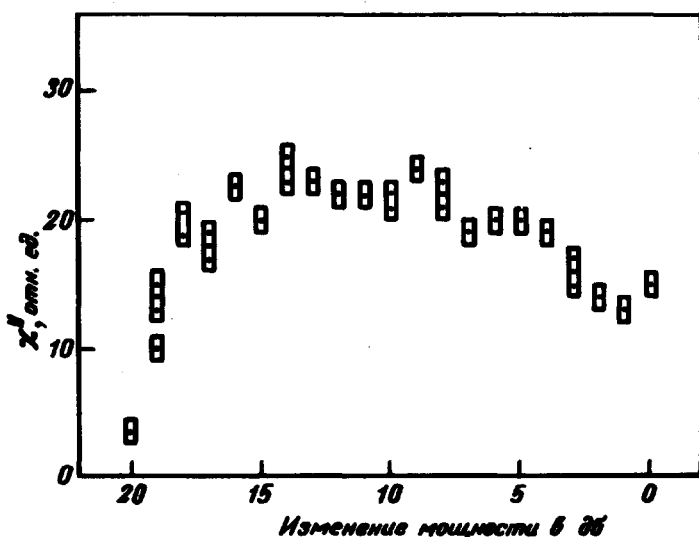


Рис. 2. Зависимость величины относительного поглощения от возбуждающей СВЧ мощности.  $\nu = 36 \text{ Гц}$ ,  $T = 2,0^\circ\text{К}$ ,  $H = 2,5 \text{ кэ}$

магнитного поля поглощение с увеличением мощности резко возрастает, а затем, пройдя через максимум, начинает спадать, как это видно из рис. 2. Оценки значений пороговых СВЧ магнитных полей  $h_c$  дают для опытов на частоте  $9,4 \text{ Гц}$   $h_c \sim 2 \text{ э}$  и для опытов на частоте  $36 \text{ Гц}$   $h_c \sim 0,5 \text{ э}$ .

Мы полагаем, что обнаруженное поглощение обусловлено параметрическим возбуждением спиновых волн с частотой равной половине возбуждающей частоты подобно тому, как это имеет место в ферритах (см., например [3]). В пользу такого объяснения свидетельствуют два факта. Во-первых, исчезновение поглощения при повороте статического магнитного поля на  $90^\circ$  относительно СВЧ поля. Во-вторых, совпадение верхней границы магнитных полей, при которых наблюдается поглоще-

ние, с рассчитанным по формуле (1) значением резонансного поля АФМР на частоте равной половине возбуждающей частоты. На рис. 1 и 2 вычисленные для соответствующих частот и температур значения резонансного поля, обозначены стрелками со значком  $H_{рез}(\nu/2)$ .

Существенные особенности параметрического возбуждения спиновых волн в антиферромагнетике состоят в следующем. Энергия спиновых волн антиферромагнетиков при малых  $k$  очень мало зависит от направления их волнового вектора  $k$  относительно направления приложенного поля. Относительное изменение энергии не превышает величины  $4\pi\kappa$  [4] ( $\kappa$  — объемная восприимчивость), т.е. согласно [1]  $\sim 1\%$ . Поэтому при любом превышении мощности над порогом при фиксированных значениях возбуждающей частоты  $\nu_{возб}$  и внешнего магнитного поля  $H$  будут возбуждаться спиновые волны с одинаковыми в пределах указанной точности значениями  $k$ , определяемыми из закона дисперсии спиновых волн:

$$\left(\frac{1}{2} h \nu_{возб}\right)^2 = (h \nu_k)^2 = (h \nu_0)^2 + \theta^2 (\sigma k)^2. \quad (2)$$

Здесь  $\nu_0$  вычисляется по формуле (1) ( $\theta$  — обменная константа,  $\sigma$  — постоянная решетки). Приняв в качестве очень грубой оценки  $\theta \sim H_E$  мы получаем, что в опытах на 9,4 Гц самые большие значения  $q = \sigma k$  для возбужденных спиновых волн  $q_{max} \sim 3 \cdot 10^{-3}$ . Для 36 Гц  $q_{max} \sim 2 \cdot 10^{-2}$ . Следует отметить, что для  $q \sim 10^{-2}$  существенную роль может играть уже анизотропия обменного взаимодействия [2].

Однако малость дипольного взаимодействия спиновых волн в антиферромагнетике ставит трудности для теоретического объяснения сравнительно низкого порога, наблюдаемого нами параметрического резонанса. В частности из расчетов Ожогина [4] следует, что в первом приближении параметрическое возбуждение АФМР и спиновых волн возможно только при наличии слабого ферромагнетизма.

В заключение авторы благодарят П.Л.Капицу за интерес к работе. Сердечную благодарность приносим С.В.Петрову, вырастившему монокристаллы  $CsMnF_3$  и предоставившего их нам, а также Г.Э.Карстенсу и А.Г.Большакову, производивших рентгеновское изучение и ориентацию образцов. Благодарим также К.И.Рассохина и С.М.Елагина за помощь при проведении экспериментов.

Добавление. После того, как статья была сдана в печать мы ознакомились с появившейся работой Сиви [5], в которой наблюдалось парамет-

рическое возбуждение двух электронных спиновых волн в  $\text{CsMnF}_3$  на частоте  $17,5 \text{ ГГц}$ .

Институт физических проблем  
Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
26 августа 1969 г.

### Литература

- [1] K.Lee, A.M.Portis, G.L.Witt. Phys. Rev. 132, 144, 1963.
  - [2] L.B.Welsh. Phys. Rev., 156, 370, 1967.
  - [3] E.Schlomann. J. Appl. Phys., 33, 527, 1962.
  - [4] В.И.Ожогин. ЖЭТФ, 48, 1307, 1965.
  - [5] M.H.Seavey. J. Appl. Phys. 40, 1597, 1969.
-