

**ДОКАЗАТЕЛЬСТВО ПОЭТАПНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ  
ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ СПИНОВЫХ ВОЛН**

*В. В. Заушкин, В. С. Львов, С. Л. Мusher, С. С. Старобинец*

В теоретической работе [1] Захарова, Львова и Старобинца показано, что развитие параметрической неустойчивости в сплошной среде происходит поэтапно. А именно, при малом превышении над порогом  $h_1$  возбуждена одна пара волн (или группа эквивалентных пар); при дальнейшем увеличении амплитуды накачки при  $h = h_2, h_3, h_4, \dots$  происходит последовательное рождение второй, третьей и т. д. пары (группы пар).

В настоящем сообщении приводятся результаты эксперимента, подтверждающего эти общие соображения на примере параллельной накачки спиновых волн в монокристаллах иттриевого граната (YIG).

Образец YIG помещался в цилиндрический резонатор  $TE_{112}$  с двумя вырожденными ортогональными модами, СВЧ магнитное поле которых  $h_{||}$  и  $h_{\perp}$  было соответственно параллельно и перпендикулярно постоянному магнитному полю  $H_0$ . Нужная поляризация мод и развязка между ними достигалась вращением подводных волноводов на торцах резонатора вокруг его цилиндрической оси.

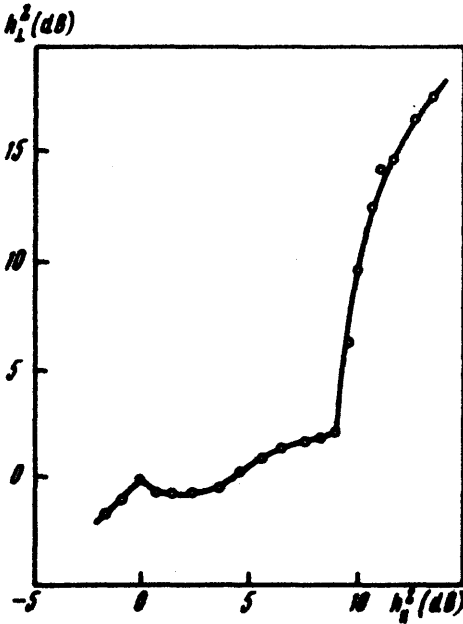


Рис. 1. Зависимость мощности излучения в перпендикулярный канал от мощности накачки для сферы YIG:  $H = 1600$  э и параллельно оси [100]

Параллельный канал  $h_{||}$  использовался для параметрического возбуждения пар спиновых волн с частотой  $\omega_p/2 = 2\pi \cdot 4,70$  Гц; перпендикулярный канал  $h_{\perp}$  служил для регистрации излучения образца на частоте накачки  $\omega_p$ . До порога возбуждения спиновых волн развязка между каналами была  $\sim 55$  dB. Мы наблюдали (рис. 1) резкое увеличение мощности излучения в перпендикулярный канал при превышении над порогом  $h_{||}^2 \sim 8 - 12$  dB. (Различные цифры соответствуют изменению постоянного поля ориентации и формы образца).

Излучение в перпендикулярный канал является результатом взаимодействия пар спиновых волн  $\sigma_{\pm k}$  с однородной прецессией намагниченности  $\sigma_0$ , описываемом гамильтонианом

$$\mathcal{H} = \frac{1}{2} \sum_k \{ V_{ok}^* \sigma_0^* \sigma_k \sigma_{-k} + \text{к.с.} \}.$$

Мощность излучения

$$h_{\perp}^2 \sim \left| \sum V_{ok}^* \sigma_k \sigma_{-k} \right|^2, \quad (1)$$

где  $V_{\theta_k} = V_0 \sin 2\theta_k e^{i\phi_k}$ ,  $\theta_k$  и  $\phi_k$  — полярный и азимутальный углы вектора  $\mathbf{k}$  пары.

Для наблюдения излучения (1) необходимо во-первых, чтобы  $\sin 2\theta_k \neq 0$ , т. е. пары с  $\theta_k = \pi/2$  не излучают в перпендикулярный канал. Во-вторых требуется некоторая асимметрия в распрежении пар по азимутальному углу  $\phi_k$ ; можно показать, что в аксиально симметричном случае сумма в (1) обращается в ноль. Наблюдаемое излучение  $h_{\perp}^2$ , очевидно, связано с кристаллографической анизотропией и другими причинами, нарушающими строгую симметрию.

Принципиально важно практически полное отсутствие излучения до превышений  $h_{\parallel}^2 = 9$  dB (рис. 1). Мы считаем, что этот факт свидетельствует о том, что в интервале  $0 - 9$  dB возбуждены только пары с  $\theta_k = \pi/2$ , несмотря на то, что амплитуда накачки  $h_{\parallel}$  превышает пороговый уровень для пар в широкой области  $\theta_k$ .

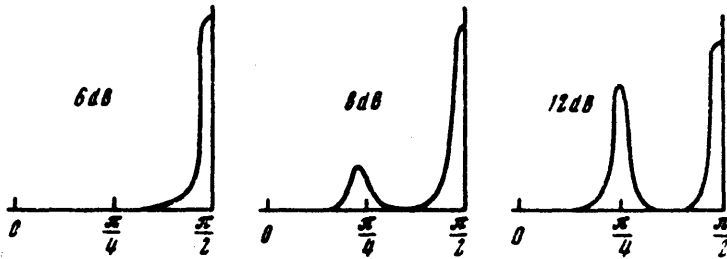


Рис. 2. Функция распределения пар по  $\theta_k$  при разных превышениях над порогом. Ширина пакетов обусловлена "Собственным" шумом параметрических спиновых волн [2]

Чтобы убедиться в такой интерпретации экспериментальных результатов мы провели численное моделирование<sup>1)</sup> поведения пар спиновых волн при параллельной накачке в YIG. Уравнения движения решались для взаимодействующих пар (число пар — 40) с гамильтонианом

$$\mathcal{H}_{int} = \frac{1}{2} \sum_{\mathbf{k}\mathbf{k}'} S_{\mathbf{k}\mathbf{k}'} a_{\mathbf{k}}^* a_{-\mathbf{k}}^* a_{\mathbf{k}'} a_{-\mathbf{k}'}, \quad (2)$$

изученным в [1]. Коэффициенты  $S_{\mathbf{k}\mathbf{k}'}$  предварительно вычислялись для конкретной экспериментальной ситуации с учетом дипольного, зеемановского и обменного взаимодействий.

Как показано в [1], взаимодействие (2) сводится к тому, что на каждую пару действует внутренняя самосогласованная накачка со стороны других пар, стремящихся ослабить действие внешней накачки. Именно это обстоятельство препятствует расплыванию пакета пар с  $\theta_k = \pi/2$ .

Результаты машинного эксперимента показаны на рис. 2 и 3. На рис. 2 видно, что до некоторого превышения  $h_2$  возбужден узкий пакет пар вблизи  $\theta_k = \pi/2$ . При  $h_2^2 \approx 8$  dB возбуждается вторая группа пар с  $\theta_2 = 45^\circ$ . При этом мы пользовались модельной зависимостью затуха-

<sup>1)</sup> Использовалась ЭЕМ БЭСМ-6 ВЦ СО АН СССР.

ния спиновых волн  $\Delta H_k = \Delta H (1 + 2 \sin^2 \theta_k)$ . Упрощающее предположение  $\Delta H_k = \text{const}$  ухудшает согласие физического ( $h_2^2 = 9 \text{ dB}$ ) и машинного ( $h_2^2 = 6 \text{ dB}$ ) экспериментов.

Физический и машинный эксперименты показали, что второй порог можно наблюдать также и по некоторым косвенным признакам, например, по характерному искажению вершины импульса накачки и по излому зависимости вещественной восприимчивости  $\chi'$  от мощности накачки. Можно думать, поэтому, что ряд последовательных порогов, обнаруженных впервые Петраковским и Бержанским по искажению импульса накачки [3] связан с поэтапным возбуждением параметрических спиновых волн.

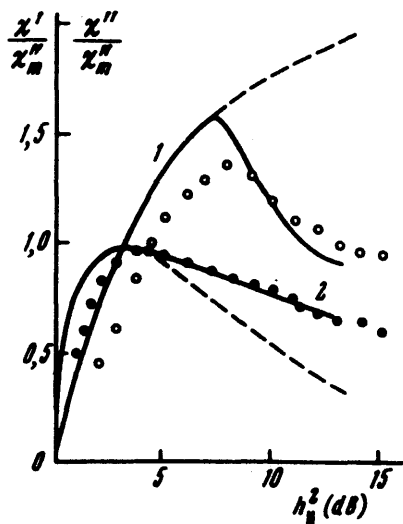


Рис. 3. Зависимости вещественной  $\chi'$  (кривая 1) и мнимой  $\chi''$  (кривая 2) частей продольной восприимчивости от мощности накачки. Пунктир — теоретические зависимости в приближении одной группы пар с  $\theta_k = \pi/2$ . Светлые точки — результаты измерения  $\chi'$ ; черные точки —  $\chi''$ . Условия эксперимента те же, что на рис. 1 и 2

Рис. 3 иллюстрирует тот факт, что рождение второй группы волн оказывает сильное влияние на  $\chi'$ , которая в результате проходит через максимум, в то время как в модели одной пары монотонно растет. Мнимая часть восприимчивости  $\chi''$  практически не чувствует второго порога.

Авторь благодарят Е.Захарова за плодотворное обсуждение работы.

Вычислительный центр  
Академии наук  
Сибирское отделение

Поступила в редакцию  
28 июля 1971 г.

### Литература

- [1] В.Е.Захаров, В.С.Львов, С.С.Старобинец. ЖЭТФ, 59, 1200, 1970.
- [2] В.Е.Захаров, В.С.Львов. ЖЭТФ, 60, 2066, 1971.
- [3] Г.А.Петровский, В.Н.Бержанский. Письма в ЖЭТФ, 12, 429, 1970.