

НАБЛЮДЕНИЕ НЕРАВНОВЕСНОЙ БОЗЕ-КОНДЕНСАЦИИ КВАЗИФОНОНОВ ВОЗБУЖДАЕМЫХ ШУМОВОЙ СВЧ НАКАЧКОЙ

А.В.Андринко, В.Л.Сафонов

Институт молекулярной физики, Российский научный центр "Курчатовский институт"

123182 Москва, Россия

Поступила в редакцию 15 июля 1994 г.

После переработки 17 августа 1994 г.

Исследовано параметрическое возбуждение шумовым СВЧ полем квазифононов в антиферромагнетике FeVO_3 . Установлено существование двух критических амплитуд накачки: первая соответствует началу нелинейного поглощения СВЧ мощности, а при превышении второй в системе возбужденных квазифононов возникают сильные фазовые корреляции - неравновесный бозе-конденсат.

Спиновые и магнитоупругие волны в магнетиках служат исключительно удобным объектом исследования физики нелинейных волновых процессов. В настоящее время достаточно хорошо изучен параметрический резонанс этих волн в переменном магнитном поле $h \cos \omega_p t$, параллельном постоянному, когда кванты СВЧ накачки рождают пары квазичастиц половинной частоты с равными, но противоположно направленными волновыми векторами ($\omega_p = \omega_{\mathbf{k}} + \omega_{-\mathbf{k}}$). Сразу за порогом возбуждения $h_{c0} = \gamma/V$ (γ – линейная скорость релаксации квазичастиц и V – коэффициент связи с полем накачки) в системе возникает динамический порядок, характеризуемый всего двумя параметрами: числом возбужденных пар магнонов (или квазифононов) и их фазой по отношению к полю накачки (см. [1-3]). Этот неравновесный бозе-конденсат' (НБК) макроскопического числа возбужденных квазичастиц, очевидно, представляет собой вынужденное колебание нелинейной среды на частоте возбуждающего поля.

Ситуация существенно усложняется если внешнее переменное поле подается в интервале частот ($\omega_p - \Delta\omega/2, \omega_p + \Delta\omega/2$) и при этом частотная ширина накачки $\Delta\omega$ превышает γ возбуждаемых волн. Тут возможность образования НБК совсем не очевидна, поскольку шумовое поле не имеет выделенной фазы и само по себе не способно устанавливать когерентное состояние в возбуждаемой системе.

Параметрический резонанс спиновых волн при шумовой накачке рассматривался Михайловым и Упоровым [4] и Черепановым [5]. Полученные ими формулы для средней пороговой мощности P_c шумового поля, при которой возникает (в среднем по времени) нелинейное поглощение в системе, совпадали при $\Delta\omega \gg \gamma$. При произвольных значениях $\Delta\omega \ll \omega_p$ можно записать

$$(h_c/h_{c0})^2 - 1 = \Delta\omega/\gamma, \quad (1)$$

где $h_c \propto P_c^{1/2}$ – интегральная характеристика амплитуды шумового СВЧ поля.

Однако принципиально отличались точки зрения указанных работ на поведение системы сразу за порогом возбуждения. В [4] утверждалось, что

основным механизмом ограничения поглощения служит нелинейная диссипация, фазовые же корреляции волн неэффективны. В [5], напротив, говорилось о том, что должны возникать сильные корреляции фаз в парах возбужденных волн (фазовый механизм ограничения) как и при монохроматической накачке. До сих пор этот вопрос оставался открытым, так как эксперименты в этой области не проводились. Добавим, что в еще одной теоретической работе [6] анализировалась шумовая накачка магнонов, когда $\Delta\omega \sim \omega_p$, и было показано, что в этом случае существует возможность неравновесной бозе-конденсации магнонов на дне зоны спиновых волн.

Другая возможность некогерентного воздействия внешних полей на спин-волновую систему была исследована Зауткиным с соавторами [7]. Изучалось параметрическое возбуждение магнонов монохроматическим СВЧ полем в железо-иттриевом гранате в условиях шумовой модуляции спектра спиновых волн и утверждалось, что этот случай соответствует немонохроматической накачке с флюктуирующей фазой. На основе качественного согласия теоретических формул с результатами эксперимента по нелинейной магнитной восприимчивости в запороговой области был сделан вывод о том, что фазовые корреляции создают основной механизм ограничения уровня возбуждения. Прямого же подтверждения наличия сильных фазовых корреляций в волновой системе получено не было. Позднее, в работе [8] рассматривалась задача о пороге \tilde{h}_c разрушения фазовых корреляций в волновой системе, возбужденной монохроматическим полем при включении шумовой модуляции спектра, и была получена формула

$$(\tilde{h}_c/h_{c0})^2 - 1 = (2 + \Delta\omega/\gamma)\Delta\omega/\gamma. \quad (2)$$

Отметим, что результаты работы [7] по измерению порога параметрического возбуждения с точностью до ошибок измерения одинаково могут быть описаны формулами (1) (использованной в [7]) и (2).

В настоящей работе изучается поведение системы неравновесных квазифонов 1) при шумовой накачке с $\gamma \leq \Delta\omega \ll \omega_p$ и 2) при монохроматической СВЧ накачке в условиях шумовой модуляции спектра магнитоупругих волн. Основная цель исследования – поиск в этой системе состояний с сильными фазовыми корреляциями (неравновесного бозе-конденсата).

Методика эксперимента

Шумовое поле с $\omega_p/2\pi = 1200 - 1250$ МГц и $\Delta\omega/2\pi \leq 3$ МГц в антиферромагнитном FeBO₃ (температура Нееля 348 К) создавалось двумя способами:

1) Шумовой сигнал с генератора Г2-37 использовался для частотной модуляции СВЧ генератора РГ4-04. Спектр накачки изучался на анализаторе спектра С4-49 и имел вид близкий к гауссову. Ширина спектра $\Delta\omega$ измерялась на полувысоте с точностью 10%.

2) СВЧ генератор работал в обычном режиме, а сигнал генератора шума в полосе частот 0 - 600 кГц после широкополосного усилителя подавался на катушку модуляции, намотанную соосно со спиральным СВЧ резонатором. Величина $\Delta\omega$ определялась, как в [7]: $\Delta\omega = (H_n V)^2/\gamma = \gamma(H_n/h_{c0})^2$. Точность измерения спектральной плотности шумового поля H_n^2 составляла 10%).

Образец объемом 1,2 × 3,5 × 7 мм³ помещался в спиральный СВЧ резонатор с невысокой добротностью (~ 300), чтобы не обрезать края спектра шумовой накачки. Эксперимент проводился при $T = 77$ К и $T = 293$ К, в поле $H =$

80 – 400 Э (постоянное и все переменные магнитные поля были параллельны). Скорость релаксации возбуждаемых квазифононов составляла $\gamma \sim 2\pi \cdot 0,1$ МГц.

СВЧ накачка осуществлялась в импульсном режиме с частотой повторений 10–500 Гц и длительностью импульсов 20–1000 мкс. На продетектированных импульсах накачки, прошедших резонатор, наблюдалось возникновение нелинейного поглощения при превышении некоторой пороговой мощности. Относительная точность измерения порога не превышала 5%.

Для регистрации неравновесного бозе-конденсата мы использовали два метода, основанных на наблюдении коллективных эффектов, связанных с этим состоянием.

Первый метод – это наблюдение модуляционного отклика α_m . Метод был разработан и широко использовался для изучения свойств неравновесного бозе-конденсата магнонов, возникающего при монохроматической накачке [2]. К образцу прикладывается слабое РЧ магнитное поле $H_m \cos \omega_m t$, модулирующее спектр квазифононов. При этом возникают колебания амплитуды и фазы НБК около их равновесных значений (так называемые коллективные колебания), которые приводят к модуляции поглощаемой образцом СВЧ мощности с амплитудой ΔP и частотой ω_m . Появление этой амплитудной модуляции ($\Delta P = \alpha_m H_m$) указывает на существование в исследуемом образце НБК.

Для регистрации α_m СВЧ сигнал, прошедший резонатор, детектировался и подавался на селективный микровольтметр, настроенный на частоту ω_m , затем на синхронный детектор, а с него на ось Y двухкоординатного самописца.

Второй метод – это наблюдение электромагнитного излучения от системы возбужденных квазифононов. Эффект, обнаруженный нами совсем недавно (подробности будут опубликованы отдельно), состоит в том, что неравновесный бозе-конденсат, созданный монохроматической СВЧ накачкой, после ее выключения создает характерное электромагнитное излучение из образца. Интенсивность излучения немонотонна во времени, а частота близка к частоте накачки.

Результаты и обсуждение

Исследование показало, что при шумовой накачке создаваемой частотной или фазовой модуляцией-(шумовой модуляцией спектра), картина нелинейного поглощения СВЧ мощности качественно идентична - следует различать два порога $h_c^{(1)} < h_c^{(2)}$. Первый соответствует началу нелинейного поглощения СВЧ мощности, а второй возникновению неравновесного бозе-конденсата.

На рис.1 приведена запись на самописце амплитуды сигнала модуляционного отклика в зависимости от интегральной мощности накачки и показаны осциллограммы СВЧ сигнала, прошедшего резонатор. Как видно, нелинейное поглощение в точке *A* отсутствует. На осциллограмме *B* видны "всплески" нелинейного поглощения выше порога $h_c^{(1)}$. С ростом мощности накачки это поглощение в среднем растет (см. осциллограмму *C*), однако сигнал модуляционного отклика еще отсутствует, хотя в образце уже существуют (в среднем) неравновесные квазифононы. При дальнейшем повышении СВЧ мощности, $h > h_c^{(2)}$, на импульсе *D* наблюдается характерный скол, такой же, как и в случае монохроматической накачки. Одновременно с ним появляется и модуляционный отклик, свидетельствующий о наличии (в среднем) фазовых корреляций в системе, то есть об образовании неравновесного бозе-конденсата.

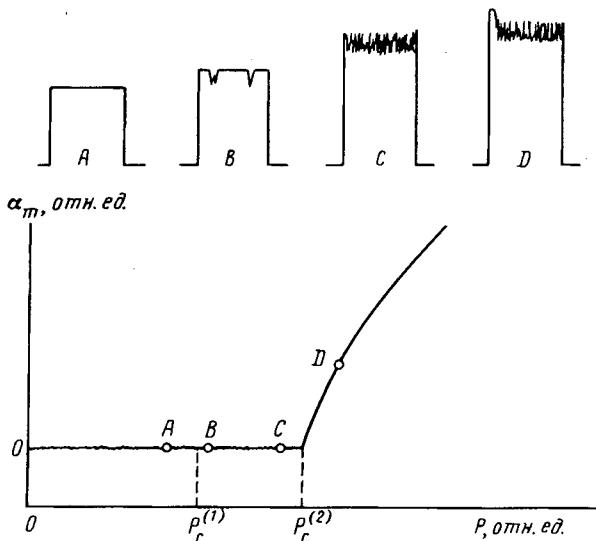


Рис.1

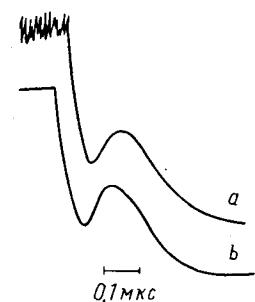


Рис.2

Рис.1. Зависимость сигнала модуляционного отклика от мощности накачки $P \propto h^2$ (запись на самописце) и осциллограммы СВЧ импульсов, прошедших резонатор, в точках A, B, C и D. Длительность импульсов 100 мкс, $H_m < 0,1\text{Э}$

Рис.2. Осциллограммы заднего фронта СВЧ импульсов и сигнал электромагнитного излучения из образца для: a – шумовой накачки и b – монохроматической накачки

Отношение порогов $h_c^{(2)}/h_c^{(1)}$ возрастало с ростом ширины $\Delta\omega$ и достигало двойки. Отношение $h_c^{(2)}$ к порогу в отсутствии шума достигало $h_c^{(2)}/h_{c0} \simeq 5$.

Образование НБК при превышении порога $h_c^{(2)}$ регистрировалось нами и по электромагнитному излучению из образца, наблюдаемому после выключения импульса накачки (см. рис.2). Подчеркнем, что при $h < h_c^{(2)}$ такое излучение отсутствует, а выше порога оно имеет примерно такую же интенсивность и время спада сигнала индукции, как и излучение бозе-конденсата, возбужденного монохроматическим СВЧ полем. Это позволяет сделать вывод о том, что НБК квазифононов, возникающий при шумовой накачке, имеет приблизительно такую же частотную ширину, как и в случае монохроматической накачки.

На рис.3 показана зависимость порогов $h_c^{(1)}$ и $h_c^{(2)}$ от спектральной плотности шумового поля при шумовой модуляции спектра квазифононов. Кривые 1 и 2 соответствуют расчету по формулам (1) и (2) без подгоночных параметров, но с использованием экспериментального значения h_{c0}^2 . Поскольку ошибка абсолютного измерения h_{c0}^2 составляет 50%, то соответственно и теоретические кривые имеют такую же ошибку по оси абсцисс, которая указана на рис.3. Видно, что при $h_c/h_{c0} < 2$ экспериментальные результаты удовлетворительно описываются динамическими теориями: 1) для порога нелинейного поглощения СВЧ мощности и 2) для порога исчезновения (и возникновения) сильных фазовых корреляций в системе. Далее обе теории дают более быстрый рост порога накачки, чем наблюдается в нашем эксперименте.

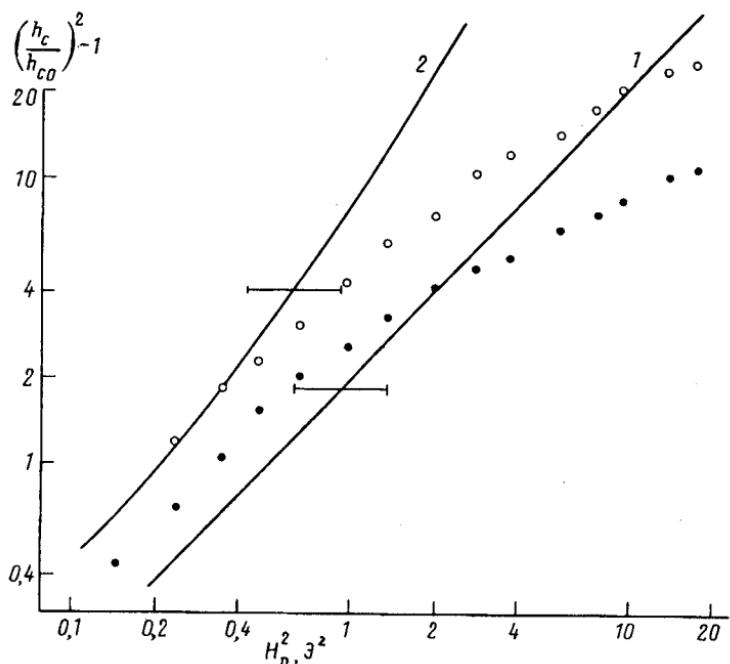


Рис.3. Относительное увеличение порогов при шумовой модуляции спектра фононов:
• – для $h_c^{(1)}$ и о – для $h_c^{(2)}$. $H = 153$ Э, $\omega_p = 2\pi \cdot 1220$ МГц, $T = 77$ К, $\Delta\omega = 2\pi \cdot 600$ кГц.
Кривые 1 и 2 проведены по формулам (1) и (2), соответственно, без подгоночных параметров

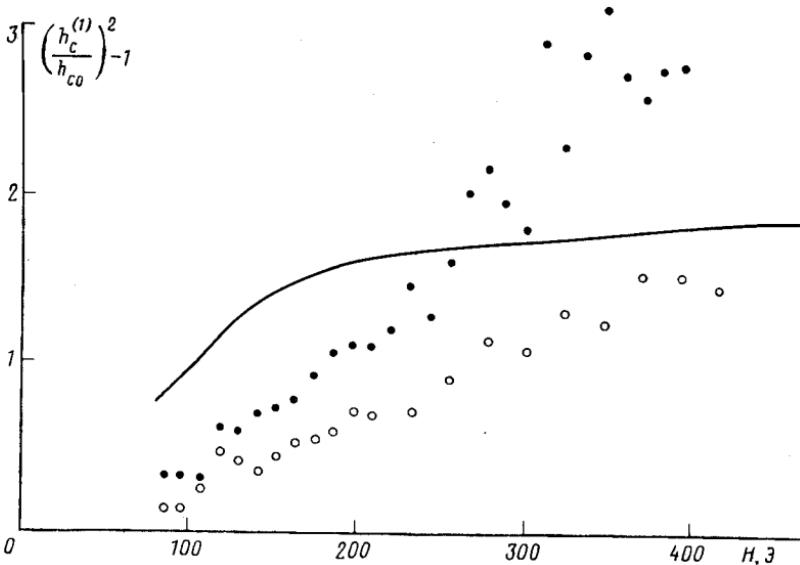


Рис.4. Относительное увеличение пороговой мощности шумовой накачки в зависимости от величины статического магнитного поля при: $\Delta\omega = 2\pi \cdot 0,5$ МГц (о) и $\Delta\omega = 2\pi \cdot 1$ МГц (•); $T = 77$ К, $\omega_p = 2\pi \cdot 1220$ МГц. Сплошная кривая соответствует расчету по формуле (1), с коэффициентом 0,2 для первого случая и коэффициентом 0,1 для второго

Функциональные зависимости $(h_c/h_{c0})^2 - 1$ от $\Delta\omega$, аналогичные рис.3, были получены и для шумовой накачки, создаваемой частотной модуляцией. Однако в этом случае формула (1), правильно описывая функциональную зависимость $h_c^{(1)}$ от $\Delta\omega$ при $\Delta\omega \leq 5\gamma$, дает величину порога нелинейного поглощения в несколько раз выше экспериментальных значений. На рис.4 показано относительное увеличение $h_c^{(1)}$ в зависимости от амплитуды статического магнитного поля. Сплошная кривая проведена по формуле (1) с использованием значений скоростей релаксации квазифононов, измеренных по порогу монохроматической накачки. Видно, что теория (1) не описывает эксперимент как по функциональным зависимостям от $\gamma = \gamma(H)$, так и по абсолютной величине (значение теоретической кривой необходимо умножить на 5 при $\Delta\omega = 2\pi \cdot 0,5$ МГц и на 10 в случае $\Delta\omega = 2\pi \cdot 1$ МГц).

Итак, нами экспериментально установлено образование когерентного состояния (неравновесного бозе-конденсата) при параметрическом возбуждении нелинейной волновой системы (квазифононов) 1) шумовой СВЧ накачкой и 2) монохроматической СВЧ накачкой при шумовой модуляции спектра. Существующая теория дает удовлетворительное описание полученных результатов для второго случая при малых амплитудах шумовой модуляции.

-
1. В.С.Львов. Нелинейные спиновые волны. М.: Наука, 1987.
 2. А.В.Андринко, В.Л.Сафонов, А.Ю.Якубовский, ЖЭТФ **93**, 907 (1987).
 3. А.В.Андринко, Л.В.Поддьяков, ЖЭТФ **95**, 2117 (1989).
 4. А.С.Михайлов, И.Б.Упоров, ЖЭТФ **77**, 2383 (1979).
 5. В.Б.Черепанов, ФТТ **22**, 43 (1980).
 6. Ю.Д.Калафати, В.Л.Сафонов, Письма в ЖЭТФ **50**, 135 (1989).
 7. В.В.Зауткин, Б.И.Орел, В.Б.Черепанов, ЖЭТФ **85**, 708 (1983).
 8. В.Л.Сафонов, ФТТ **34**, 304 (1992).