

Спин-волновые резонансы в антиферромагнетиках

Х.-А. Круг фон Нидда

*Center for Electronic Correlations and Magnetism EKM, Experimentalphysik V
Universität Augsburg, Augsburg, D-86135, Germany*

Л.Е. Свистов, Л.А. Прозорова

*Институт физических проблем им. П.Л. Капицы РАН, г. Москва, 119334, Россия
E-mail: prozorova@kapitza.ras.ru*

Статья поступила в редакцию 22 декабря 2009 г.

В образцах FeVO_3 в виде тонких пластин удалось наблюдать спин-волновые резонансы с рекордно большими волновыми числами ($n \sim 100\text{--}1000$), соответствующими значениям волновых векторов $k \sim 10^5\text{--}10^6 \text{ см}^{-1}$. Исследования спин-волновых резонансов позволяют получать информацию о спектре спиновых волн. Определена температурная зависимость константы неоднородного обмена в FeVO_3 . При температуре большей, чем $1/3$ от температуры Нееля, наблюдается заметное смягчение спектра магнов, которое, по-видимому, связано с их взаимодействием. Обнаружено, что эффективность возбуждения спин-волновых резонансов существенно зависит от искусственно создаваемых в образце неоднородных упругих деформаций. Предложена модель, которая описывает результаты эксперимента.

У зразках FeVO_3 у вигляді тонких пластин удалось спостерігати спин-хвильові резонанси з рекордно великими хвильовими числами ($n \sim 100\text{--}1000$), відповідними до значень хвильових векторів $k \sim 10^5\text{--}10^6 \text{ см}^{-1}$. Дослідження спин-хвильових резонансів дозволяє одержувати інформацію про спектр спинових хвиль. Визначено температурну залежність константи неоднорідного обміну в FeVO_3 . При температурі більшій, ніж $1/3$ від температури Нееля, спостерігається помітне пом'якшення спектра магнів, яке, ймовірно, пов'язано з їхньою взаємодією. Виявлено, що ефективність порушення спин-хвильових резонансів суттєво залежить від неоднорідних пружних деформацій, які штучно створені у зразку. Запропоновано модель, яка описує результати експерименту.

PACS: **76.50.+g** Ферромагнитный, антиферромагнитный и ферримагнитный резонансы; спин-волновой резонанс.

Ключевые слова: спин-волновые резонансы, спиновые волны, антиферромагнетики.

1. Введение

В идеальном бесконечном кристалле линейное возбуждение спиновых волн возможно лишь при совпадении частоты поля накачки ω_p с частотой спиновой волны ω_k (закон сохранения энергии) и совпадении их волновых векторов (закон сохранения квазиимпульса). Величина волнового вектора электромагнитного поля СВЧ диапазона невелика ($\leq 10^2 \text{ см}^{-1}$), в этом случае возбуждение спиновых волн с большими волновыми векторами невозможно.

Наличие в образце дефектов существенно меняет ситуацию: закон сохранения импульса квазичастиц может нарушаться и линейное возбуждение становится возможным. Одним из возможных естественных дефектов в магнетиках являются границы образца. В слу-

чае, если длина свободного пробега магнона становится сравнимой с размерами образца, спектр собственных магнитных возбуждений становится дискретным. Как следствие возникает ненулевая связь однородного СВЧ поля со спин-волновыми модами образца с волновыми числами, отличными от нуля.

В образце в форме плоскопараллельной пластины с СВЧ магнитным полем могут быть связаны моды с $k_{\parallel} = 0$ и $k_{\perp} \neq 0$, т.е. однородные в плоскости и неоднородные по толщине пластины колебания намагниченности. Возможность возбуждения таких колебаний (стоячих спиновых волн) однородным переменным магнитным полем была предсказана Киттелем [1] и экспериментально подтверждена в работе [2]. Это явление получило название спин-волнового (СВ) резонанса. Для определения значений магнитных полей СВ

резонансов, помимо объемных свойств магнетика, необходимо знать параметры закрепления магнитных моментов на поверхности [3]. При полном закреплении спинов на поверхности кристалла граничные условия определяются соотношением:

$$k_{zn} = n\pi / d. \quad (1)$$

В этом случае с магнитным СВЧ полем связаны только моды с нечетным числом полуволн. Эффективность такой связи убывает обратно пропорционально величине волнового вектора k_z .

Исследования спин-волновых резонансов в ферро- и ферримагнитных пленках позволяют получать информацию о константах неоднородного обменного взаимодействия и о поверхностных свойствах магнетиков [3].

В данной работе будут описаны эксперименты, посвященные линейному возбуждению СВЧ магнитным полем спин-волновых резонансов с большими волновыми векторами ($k \approx 10^5 - 10^6$) см^{-1} в антиферромагнетике. Исследования проводились на монокристаллах легкоплоскостного антиферромагнетика FeVO_3 .

2. Образцы

FeVO_3 — ромбоэдрический антиферромагнетик (D_{3d}^6 ; $T_N = 348$ К) с анизотропией намагниченности типа «легкая плоскость», статические и динамические свойства которого достаточно подробно изучены [4].

Спектр низкочастотной ветви спиновых волн при $\mathbf{H} \perp C_3$ имеет следующий вид:

$$\omega_{1,k}^2 = \gamma^2 [H(H + H_D) + H_\Delta^2 + \alpha_\perp^2 k_\perp^2 + \alpha_\parallel^2 k_\parallel^2], \quad (2)$$

где γ — магнитомеханическое отношение, H_D — поле Дзялошинского, H_Δ^2 — параметр спектра, обусловленный магнитоупругим взаимодействием, H — статическое магнитное поле, лежащее в базисной плоскости кристалла, α_\parallel и α_\perp — константы неоднородного обменного взаимодействия, k_\parallel и k_\perp — компоненты волнового вектора вдоль оси C_3 и в базисной плоскости. При 77 К константы, определяющие спектр низкочастотной ветви спиновых волн, равны [4]: $\gamma = 2\pi \cdot 2,8$ ГГц/кЭ, $H_D = 100$ кЭ, $H_\Delta^2 = 3,6$ кЭ², $\alpha_\parallel = 7,8 \cdot 10^{-2}$ Э·см.

Из экспериментов по параметрическому возбуждению спиновых волн следует, что время жизни магнов с частотой $\omega_k / 2\pi \approx 10^{10}$ Гц и волновыми векторами $\mathbf{k} \approx 0 - 10^6$ см^{-1} в области температур жидкого гелия достаточно велико: $\tau \approx 0,1 - 1$ мкс. Скорость магнов с волновыми векторами $10^5 - 10^6$ см^{-1} составляет $s_k = |\partial\omega_k / \partial k| \approx 10^5 - 10^6$ см/с. Используя эти значения, можно оценить длину свободного пробега магнов: $\lambda = s\tau \approx 1$ мм. Поэтому для наблюдения СВ резонансов в области гелиевых температур следует применять образцы в виде пластинок толщиной менее 0,1 мм.

В наших экспериментах использовались монокристаллические пластинки толщиной $d \approx 0,02$ мм и линейными размерами в плоскости примерно 3–4 мм. Развитые грани совпадали с базисной плоскостью и были оптически гладкими. Качество образцов контролировалось методом рентгеновской топографии. Выбирались однородные, структурно монодоменные образцы.

3. Методика измерений

Исследования проводились на стандартном ЭПР спектрометре 8 мм диапазона фирмы Bruker. Измерялась производная по полю амплитуды СВЧ сигнала, прошедшего через резонатор с исследуемым образцом, dP/dH в зависимости от статического магнитного поля H . Измерения проведены в температурном интервале 4,2–280 К.

4. Спин-волновые резонансы в недеформированных образцах FeVO_3

Исследования проводили на монокристаллических пластинах FeVO_3 толщиной $d = 0,02$ мм на частоте $\omega_p / 2\pi = 34,4$ ГГц. Из экспериментов по антиферромагнитному резонансу следует, что резонансное поглощение в FeVO_3 зависит от способа крепления образца. Самым деликатным способом оказался следующий. В тонкостенную стеклянную пробирку засыпали слой химически чистой мелкой поваренной соли. Затем на него горизонтально укладывали исследуемый образец FeVO_3 . Поверх него засыпали слой соли, который препятствовал движению образца. Пробирку вставляли в резонатор. Такое крепление менее всего деформировало образец — это контролировалось по ширине линии АФМР. На рис. 1 приведены записи линии антиферромагнитного резонанса в FeVO_3 , измеренные при разных значениях температуры. Статическое поле \mathbf{H} и высокочастотное магнитное поле \mathbf{h} были взаимно перпендикулярны и лежали в базисной плоскости кристалла. Положение линии при повышении температуры сдвигалось в область больших полей. На рис. 1,б приведена зависимость резонансного поля H_0 от температуры. Ширина линии АФМР во всем диапазоне температур составляла (12 ± 1) Э. При $T < 30$ К линия АФМР становилась несимметричной.

На рис. 2 приведены записи полевой зависимости производной поглощаемой образцом СВЧ мощности dP/dH , проведенные при разных значениях температуры. На записях наблюдаются регулярные линии поглощения, резонансные поля которых, так же, как и положения линий АФМР, с повышением температуры сдвигались в область больших полей. Чувствительность прибора для записей, сделанных при различных температурах, была одинаковой. За отдельными наиболее ярко выраженными спин-волновыми резонансами удалось проследить в широкой области температур.

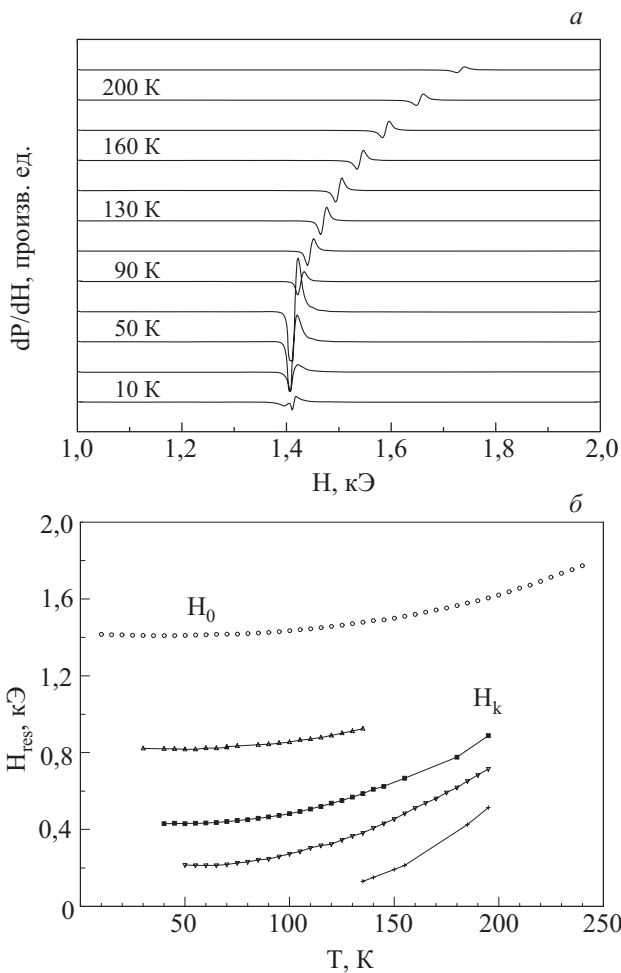


Рис. 1. *a* — Записи полевой зависимости производной поглощаемой образцом СВЧ мощности dP/dH , проведенные при разных значениях температуры. *б* — Температурные зависимости поля АФМР и четырех спин-волновых резонансов, которые удалось проследить в широкой области температур в измерениях, результаты которых представлены на рис. 2 (масштаб вдоль оси y для линий поглощения, снятых при разных температурах, приведенных на данном рисунке, различный).

На рис. 1, *б* приведены температурные зависимости резонансных полей четырех наиболее ярко выраженных спин-волновых резонансов. Спин-волновые резонансы с большими волновыми векторами наблюдались вплоть до температур ~ 250 К. В области температур ~ 50 К амплитуда спин-волновых резонансов начинала убывать при понижении температуры, и при $T \lesssim 30$ К резонансы становились практически неразрешимы. Ширина линии отдельного спин-волнового резонанса составляла приблизительно 6 Э вблизи H_0 и 10 Э в малых полях.

На рис. 2, *б* приведен фрагмент записи $dP/dH(H)$ при $T = 100$ К. Отрезком обозначена разница между полями соседних спин-волновых резонансов, вычисленных по формуле (2). Видно, что для недеформированных об-

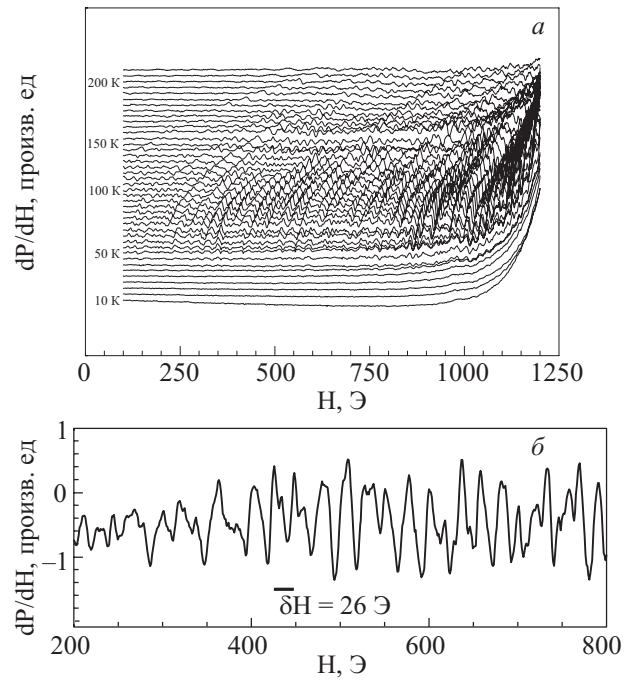


Рис. 2. Записи полевой зависимости производной поглощаемой образцом СВЧ мощности dP/dH , проведенные при разных значениях температуры. Масштаб вдоль оси y для линий поглощения снятых при разных температурах различный.

разцов возбуждаются спин-волновые резонансы как с четными, так и с нечетными волновыми числами.

5. Спин-волновые резонансы в неоднородно деформированных образцах $FeVO_3$

Исследованные нами образцы представляли собой тонкие пластинки, толщина которых более чем в 100 раз меньше, чем другие линейные размеры. При нанесении на одну из развитых граней образца слоя клея в образце будут создаваться напряжения, неоднородные по толщине пластины: с одной стороны пластины будет реализовываться сжатие, а с другой — растяжение (см. вставку на рис. 4). Поскольку коэффициенты температурного расширения клея и образца различные, то величина напряжений будет зависеть от температуры. На фоне уширенной линии АФМР наблюдаются узкие резонансные линии, плотность и интенсивность которых увеличивается вблизи резонансного поля H_0 . Наиболее ярко выраженная тонкая структура наблюдается вблизи 100 К. При температуре ниже 30 К тонкая структура на фоне уширенной линии АФМР исчезает.

На рис. 3 приведен фрагмент записи линии АФМР при $T = 80$ К. На том же рисунке на верхней шкале показан результат расчета положений спин-волновых резонансов по формуле (2) с приведенными выше значениями констант и со значениями волнового числа $k_z = \pi n/d$, где в данном случае толщина пластины d равна 0,016 мм. Разницы полей между соседними резо-

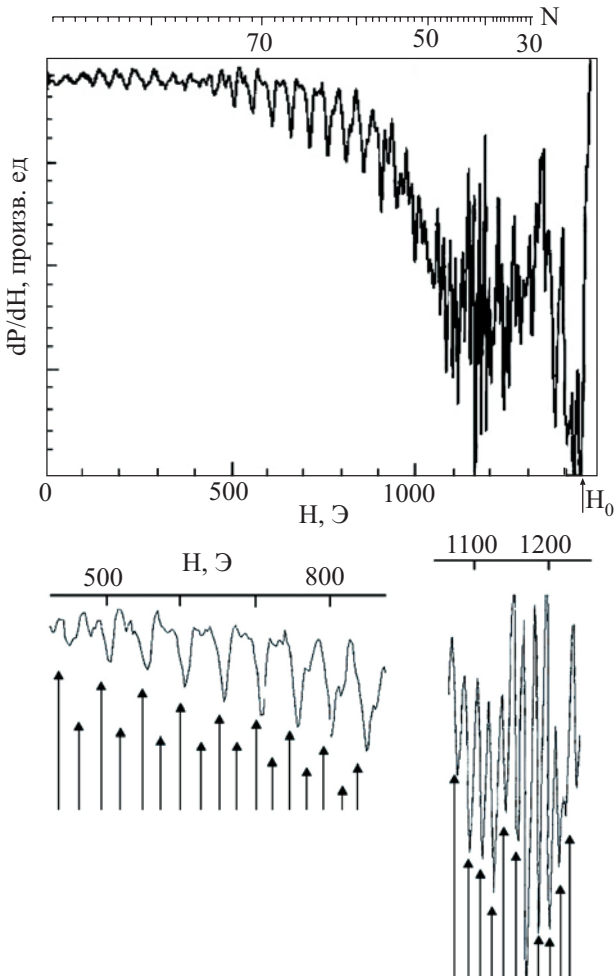


Рис. 3. Фрагмент записи производной поглощаемой мощности dP/dH , измеренной на образце, одна из широких плоскостей которого покрыта тонкой пленкой клея. $T = 80$ К. На верхней шкале рисунка указаны положения спин-волновых резонансов, полученные в результате расчета по формулам (1),(2) со значениями волнового числа $k_z = \pi n/d$, толщина пластины $d = 0,016$ мм. На нижней панели приведены два фрагмента записи в большем масштабе. Стрелками обозначены вычисленные значения резонансных полей.

нансными особенностями находятся в хорошем соответствии с вычисленными. Спин-волновые резонансы, наблюдаемые в области малых полей, соответствуют числам $n \approx 80$, т.е. значениям $k_z \approx 1,5 \cdot 10^5 \text{ см}^{-1}$. Спин-волновые резонансы с $n \leq 20-30$ вблизи H_0 разрешить не удастся. Эффективность возбуждения мод с четными и нечетными числами полувольт n приблизительно одинакова в окрестности поля АФМР. Вдали от поля H_0 каждый второй резонанс был существенно слабее соседних. Интенсивность спин-волновых резонансов при неоднородной деформации образца как минимум на два порядка больше, чем в недеформированном образце.

Влияние одноосного сжатия на спектр спиновых волн в антиферромагнетиках с магнитной анизотропией типа «легкая плоскость» исследовано экспериментально и теоретически в работах [5–7]. Было показано, что действие одноосного сжатия \mathbf{p} в базисной плоскости кристалла можно описать с помощью эффективного магнитного поля $\mathbf{H}_{me}(\mathbf{p})$. В спектре спиновых волн возникает дополнительная щель $H_{\Delta 1}^2$, связанная с этим полем следующим соотношением:

$$H_{\Delta 1}^2 = 2H_E H_{me}(p), \quad (3)$$

где H_E — обменное поле. Таким образом, в результате «обменного усиления» даже слабые деформации в таких антиферромагнетиках приводят к существенному изменению спектра спиновых волн. При одноосной деформации спектр спиновых волн будет иметь величину магнитоупругой щели, переменную по толщине пластины. То есть волновой вектор спиновой волны, распространяющейся в направлении, перпендикулярном базисной плоскости, будет зависеть от координаты вдоль оси z .

Обсудим, как изменится спектр спин-волновых резонансов при наличии таких напряжений. Условие наблюдения спин-волновых резонансов можно записать в виде [3]:

$$\int_0^d k(z, p, H) dz = \pi n, \quad (4)$$

где n — целое число, определяющее номер спин-волнового резонанса. Это уравнение записано в предположении полного закрепления спинов на границах образца. Предполагая, что величина одноосного напряжения меняется по линейному закону от p до $-p$, можно рассчитать значения резонансных полей спин-волновых резонансов для пластины заданной толщины и сравнить их с экспериментом. Величину неконтролируемого в процессе эксперимента параметра p оценим, исходя из положения особенностей на полевых зависимостях dp/dH , наблюдаемых в полях H_{01} и H_{02} (см. экспериментальную кривую на верхней панели рис. 4), которые мы связываем со значениями полей, при которых выполняются условия $\omega_p \approx \omega(k \approx 0, H)$ вблизи верхней и нижней граней кристалла. На нижней панели рис. 4 сплошными кривыми 1, 2 приведены рассчитанные зависимости $Phase/\pi = \int_0^d k(z) dz / \pi$ от величины магнитного поля.

Спин-волновые резонансы можно ожидать вблизи полей, при которых фаза принимает значения, кратные π . На том же рисунке черными прямоугольниками отмечены номера (n) спин-волновых резонансов при некоторых значениях поля H , полученные экспериментально. Высота прямоугольника соответствует величине

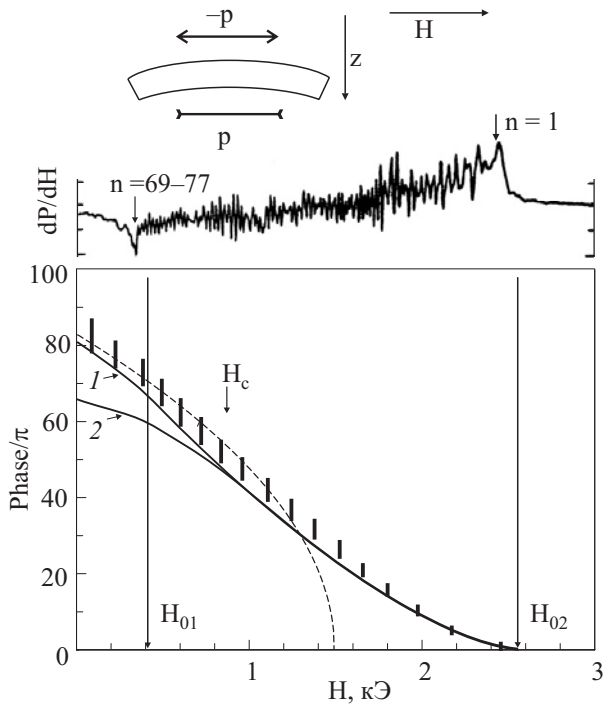


Рис. 4. Сплошные кривые 1, 2 на нижней панели — рассчитанные зависимости $n(H) = \text{Phase} / \pi = \int_0^d k(z) dz / \pi$ в зависимости от величины магнитного поля. Спин-волновые резонансы можно ожидать вблизи полей, при которых фаза принимает значения, кратные π . Кривая 1 вычислена с учетом поворота вектора антиферромагнетизма в полях $H < H_c$ и условия $\mathbf{p} \parallel \mathbf{H}$, а кривая 2 — при условии $\mathbf{l} \perp \mathbf{H}$ во всем образце, при всех H . Пунктирная кривая — рассчитанная зависимость $n(H)$ для недеформированного образца. Черные прямоугольники — зависимость $n(H)$, полученная из экспериментальной кривой, приведенной на верхней панели рис. 4.

ошибки экспериментального определения n . Экспериментальная зависимость $n(H)$ хорошо описывается предложенной моделью. В области малых полей величина $n(H)$ сильно зависит от угла между векторами \mathbf{p} и \mathbf{H} . Возможно, что наблюдаемое расхождение экспериментальной и модельной кривой 1 в области малых полей связана с непараллельностью этих векторов.

На рис. 5 приведены вычисленные полевые зависимости коэффициента связи $A(H)$ спин-волновых резонансов с однородным СВЧ полем для двух значений неоднородной деформации. На рис. 5,а приведены результаты вычислений со значением параметра p , тем же, что и на рис. 4,а, на рис. 4,б — со значением p , соответствующим рис. 3. Коэффициент связи $A(H)$ вычислялся как:

$$A(p, H) = A_0 \int_0^d \sin \left(\int_0^z k(z, p, H) dz \right) dz. \quad (5)$$

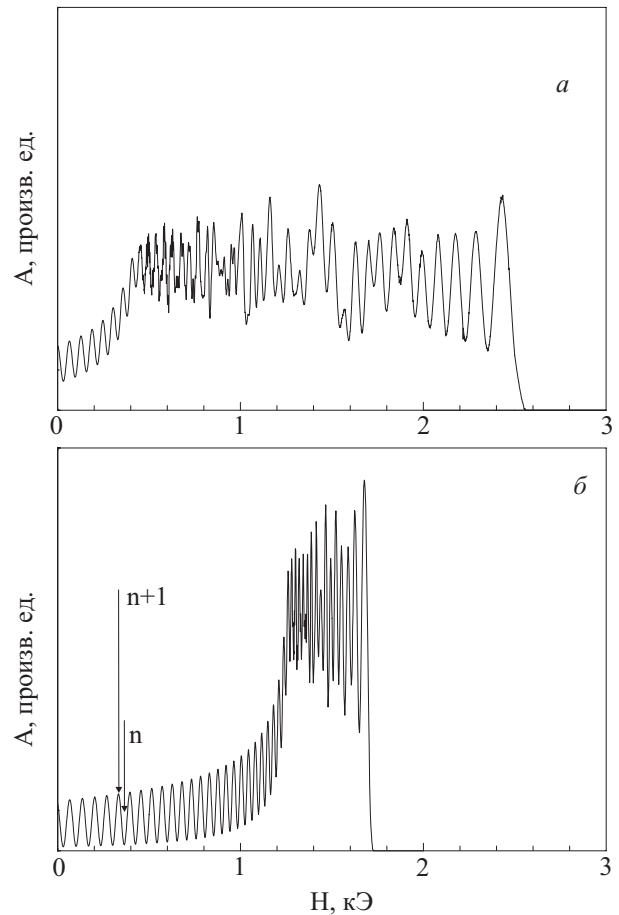


Рис. 5. Вычисленные полевые зависимости коэффициента связи спин-волновых резонансов с однородным СВЧ полем для двух значений неоднородной деформации. Панель (а) соответствует той же величине p , что и деформации образца, принятые на рис. 4, $H_c = 200$ Э, а (б) со значением p , соответствующим рис. 3 $H_c = 100$ Э.

Как видно, благодаря неоднородной деформации образца с СВЧ магнитным полем будут связаны спин-волновые резонансы как с четным числом полувольт, укладывающимся на толщине образца, так и с нечетным. В области магнитных полей $H_{c1} < H < H_{c2}$ амплитуды спин-волновых резонансов в рамках обсуждаемой модели будут иметь нерегулярный характер, в то время как в области малых полей — регулярный.

Таким образом, обсуждаемая модель удовлетворительно описывает наблюдаемые экспериментально спектры.

6. Заключение

Итак, в монокристаллических пластинах FeVO_3 наблюдаются спин-волновые резонансы с $k \approx 1,5 \cdot 10^5 \text{ см}^{-1}$. Тот факт, что интенсивность наблюдаемых спин-волновых резонансов в неоднородно напряженных образцах, по меньшей мере, в 100 раз превосходит их интенсивность в ненапряженных образцах, свидетель-

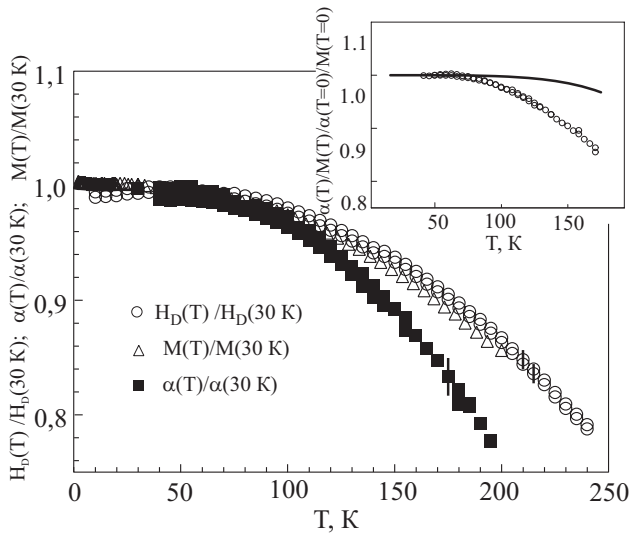


Рис. 6. Температурные зависимости: (○) — поля Дзялошинского $H_D(T)$, определенного из измерений АФМР; (■) — константы неоднородного обменного взаимодействия $\alpha(T)$; (Δ) — магнитного момента образца FeBO_3 , измеренного в поле $H = 1,5$ кЭ, приложенном в базисной плоскости кристалла. Все зависимости приведены к значению соответствующих величин, измеренных при $T = 30$ К. На вставке — результат расчета поправки к константе неоднородного обменного взаимодействия (α/M) за счет взаимодействия магненов [8] и то же отношение, полученное из данных, приведенных на основном рисунке.

стует о том, что наличие упругого напряжения существенно влияет на связь стоячей спиновой волны с СВЧ полем. Кроме того, наличие неоднородной деформации с неизбежностью приводит к появлению связи с СВЧ накачкой резонансов как с четным, так и нечетным значением n (см. рис. 5). В недеформированных образцах также наблюдаются спин-волновые резонансы не только с нечетными, но и с четными n , что, по-видимому, связано с внутренними напряжениями в этих кристаллах.

Спин-волновые резонансы уверенно наблюдались в температурном интервале 30–250 К. Для регистрации резонансов необходимо, чтобы ширины резонансных линий были меньше, чем расстояние между ними. Верхняя температурная граница определяется возрастанием затухания спиновых волн за счет трехмагнонных процессов [4]. Нижняя — близостью к пику затухания при $T = 18$ К, связанному с процессом «медленной релаксации», возникающим из-за наличия в кристаллах FeBO_3 примеси ионов Fe^{2+} [4]. Поскольку спин-волновые резонансы хорошо разрешены в широкой области температур, то для резонансов с большими волновыми числами можно было определить температурную зависимость их резонансного поля с постоянным волновым числом. На рис. 6 приведена температурная зависимость резонансных полей для нескольких спин-волновых резонансов. Предполагая,

что спектр спиновых волн во всей области исследованных температур определяется уравнением (2), можно определить температурную зависимость константы неоднородного обмена $\alpha_{||}(T)$.

На рис. 6 приведены температурные зависимости $\alpha_{||}(T)$ и $H_D(T)$. Видно, что зависимость поля $H_D(T)$ с точностью эксперимента совпадает с температурной зависимостью спонтанного магнитного момента образца $M(T)$, измеренной в том же образце на стандартном SQUID магнитометре. Величина константы неоднородного обмена $\alpha_{||}$ при $T > 100$ К уменьшается при повышении температуры заметно быстрее. Учет влияния трехчастичных и четырехчастичных процессов взаимодействия магненов на их спектр в антиферромагнетиках типа «легкая плоскость» был проведен в [8]. На вставке рис. 6 приведен результат расчета поправки к обменной константе α/M . Вычисленная величина уменьшения обменной константы приблизительно в 5 раз меньше, чем наблюдаемая экспериментально при температуре 150 К. Возможно, что наблюдаемое расхождение обусловлено тем, что вычисления [8] проведены в предположении, что нижняя ветвь магненов бесщелевая ($H = 0$; $H_{\Delta}^2 = 0$).

Авторы выражают благодарность В.Н. Селезневу за предоставление выращенных им монокристаллов FeBO_3 . Работа поддержана Российским Фондом Фундаментальных Исследований, грант No7-02-00725, а также German Research Society (DFG) within the Transregional Collaborative Research Center (TRR 80).

1. С. Kittel, *Phys. Rev.* **110**, 1295 (1958).
2. C.W.Jr. Seavey and P.E. Tannenwald, *Phys. Rev. Lett.* **1**, 168 (1958).
3. А.Г. Гуревич, Г.А. Мелков, *Магнитные колебания и волны*, Физматлит, Москва (1994).
4. Б.Я. Котюжинский, Л.А. Прозорова, *ЖЭТФ* **54**, 1013 (1990).
5. А.С. Боровик-Романов, Е.Г. Рудашевский, *ЖЭТФ* **47**, 2095 (1964).
6. Е.А. Туров, В.Г. Шавров, *ФТТ* **7**, 217 (1965).
7. Е.А. Туров, Н.Г. Гусейнов, *ЖЭТФ* **38**, 1326 (1960).
8. В.Л. Соболев, *дисс. докт. физ.-мат. наук*, ДонФТИ, Донецк (1983).
9. Л.Е. Свистов, В.Л. Сафонов, К.Р. Хачеватская, *ЖЭТФ* **112**, 564 (1997).

Spin wave resonances in antiferromagnets

H.A. Krug von Nidda, L.E. Svistov, and L.A. Prozorova

Spin wave resonances with enormously large wave numbers corresponding to wave vectors $k \sim 10^5 - 10^6 \text{ cm}^{-1}$ are observed in thin plates of FeBO_3 .

The spin-wave resonance study allows one to obtain information on spin wave spectrum. The temperature dependence of inhomogeneous exchange constant is determined for FeBO_3 . A considerable spectrum softening of magnons resulting from their interaction, is observed at temperatures above $1/3$ of the Neel temperature. The excitation level of spin-wave resonances is found to depend significantly on inhomogeneous

elastic deformations artificially created in the sample. A theoretical model is proposed to describe the observed effects.

PACS: **76.50.+g** Ferromagnetic, antiferromagnetic, and ferrimagnetic resonances; spin-wave resonance.

Keywords: spin-wave resonances, spin wave, antiferromagnetics.