

# Сигналы ЯМР магнитных неоднородностей типа $0^\circ$ доменная граница в кубических кристаллах ферритов–гранатов

© И.В. Владимиров, Р.А. Дорошенко, С.В. Серегин, Р.С. Фахретдинова

Институт физики молекул и кристаллов Российской академии наук,  
450075 Уфа, Россия

E-mail: igor@physics.bash.ru

(Поступила в Редакцию 6 февраля 1998 г.)

Численным методом исследованы сигналы ЯМР  $^{57}\text{Fe}$  от магнитных неоднородностей типа  $0^\circ$  доменная граница, возникающих на месте стабилизации  $180^\circ$  доменной границы в кубических кристаллах ферритов–гранатов. Проведен анализ зависимости формы линии поглощения ЯМР от констант наведенной анизотропии и величины постоянного магнитного поля.

До сих пор анализ свойств сигналов ЯМР ядер, локализованных в объеме магнитных неоднородностей (например, доменных границ (ДГ) разного типа) магнитоупорядоченных кристаллов, проведен лишь для материалов с пространственно однородными параметрами, определяющими структуру ДГ и других магнитных неоднородностей, например [1–3]. Однако стабилизация ДГ, связанная с наведением анизотропии, наличие дефектов кристаллической структуры, нарушающих пространственную однородность, приводят к возникновению магнитных неоднородностей нового типа, которые могут значительно изменить спектр ЯМР.

В растоящей работе представлены результаты исследований сигналов ЯМР от планарных магнитных неоднородностей типа  $0^\circ$  ДГ, возникающих на месте стабилизации  $180^\circ$  блоховской ДГ в кубических кристаллах с комбинированной магнитной анизотропией. (ЯМР-сигналы магнитных неоднородностей (МНО) возникают при колебаниях намагниченности МНО в продольном радиочастотном поле.) Рассмотрены зависимости формы линии поглощения ЯМР  $0^\circ$  ДГ от величины константы наведенной анизотропии и напряженности постоянного магнитного поля. Сигналы ЯМР  $0^\circ$  ДГ рассчитывались численно, с учетом изменения структуры магнитной неоднородности в постоянном магнитном поле.

Стабилизация  $180^\circ$  блоховской ДГ приводит к появлению в плотности энергии анизотропии магнетика членов, явно зависящих от пространственной координаты. Поэтому описать структуру магнитной неоднородности, возникающей на месте стабилизации ДГ, аналитическим выражением невозможно. Для расчета структуры МНО использовался метод, предложенный в [4], суть которого заключается в том, что уравнение, описывающее вращение вектора намагниченности

$$\varphi'' - f(y, \varphi, \varphi') = 0, \quad (1)$$

разлагается в ряд Тейлора вблизи его приближенного решения в виде

$$\varphi''_{n+1} - \left( f(y, \varphi_n, \varphi'_n) + \frac{\partial f(y, \varphi_n, \varphi'_n)}{\partial \varphi} (\varphi_{n+1} - \varphi_n) \right) = 0, \quad (2)$$

где  $\varphi_n$  — приближенное решение уравнения. Представляя производные в виде конечных разностей, получим

систему линейных алгебраических уравнений с трехдиагональной матрицей, которая решается методом прогонки. Полученное решение представляет распределение направлений вектора намагниченности в МНО. Направление намагниченности в основном объеме образца совпадает с направлением [111], т.е. крайние условия задачи имеют вид  $\varphi(\pm\infty) = 0$ ,  $\varphi'(\pm\infty) = 0$ . Плоскость разворота намагниченности (110). В плотности энергии учитывались следующие члены: энергии  $K_1 < 0$  кубической и  $K_u$  одноосной (снимающей вырождение кубических осей с осью симметрии вдоль [111]) анизотропий, обменная энергия  $A$ , энергии постоянного магнитного поля  $h^*$  и РЧ-поля с амплитудой  $h'$ , приложенных вдоль направления [111], энергии наведенной анизотропии ( $F, G$ )

$$e_{DW}/K_u = -q \left( \frac{\sin^4 \varphi}{4} + \frac{\cos^4 \varphi}{3} - \frac{\sqrt{2}}{3} \sin^3 \varphi \cos \varphi \right) + \sin^2 \varphi - h \cos \varphi + a(\varphi')^2 - f \sum_i \alpha_i^2 \beta_i^2 - g \sum_{i \neq j} \alpha_i \alpha_j \beta_i \beta_j. \quad (3)$$

Здесь  $q = |K_1|/K_u$ ,  $h = (h^* + h')/K_u$ ,  $a = A/K_u$ ,  $f = F/K_u$ ,  $g = G/K_u$ ,  $\alpha_i$  — направляющие ко-

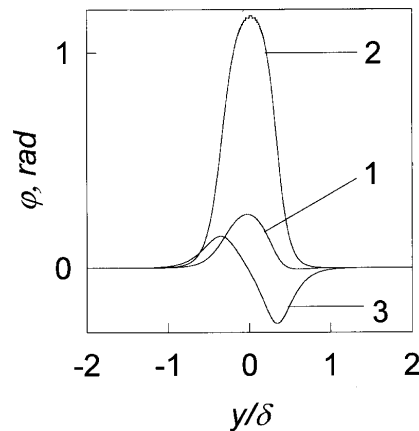
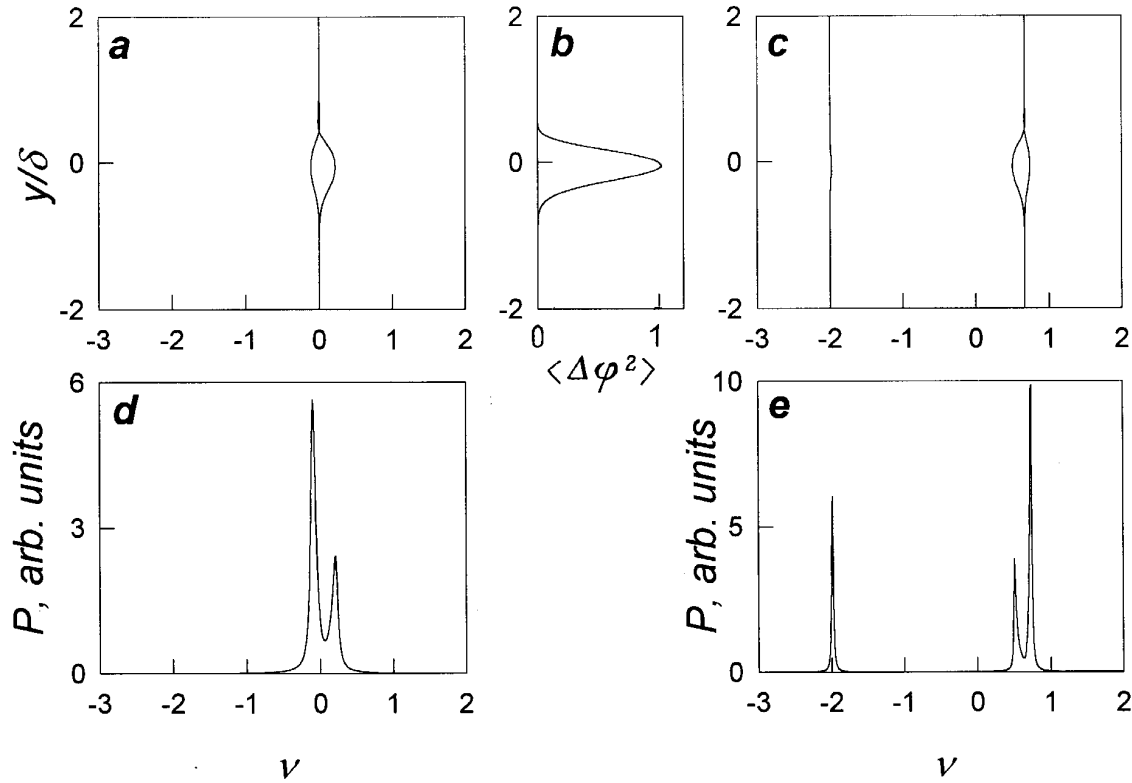


Рис. 1. Структура магнитной неоднородности при  $q = 100$ : 1 —  $g = 30$ ,  $f = 0$ ; 2 —  $g = 70$ ,  $f = 0$ ; 3 —  $g = 0$ ,  $f = 30$ .



**Рис. 2.** Изменение частоты (a, c) и  $\langle \Delta\varphi^2 \rangle$  (b) по ширине магнитной неоднородности и формы линий поглощения ЯМР (d — для тетраэдрических позиций; e — для октаэдрических позиций). Кривые рассчитаны при  $g = 30$ ,  $f = 0$ ,  $q = 100$ ,  $h'/K_u = 0.1$ .

синусы вектора намагниченности,  $\beta_i$  — направляющие косинусы вектора намагниченности в исходной  $180^\circ$  блоховской ДГ ( $\beta_i$  зависят от угла  $\varphi_0$ , который описывает вращение вектора намагниченности в  $180^\circ$  блоховской ДГ и определяется соотношением  $\text{ctg } \varphi_0 = (\sqrt{4 + 3q} \text{sh}(y/\delta) + \sqrt{2}q/3) / (2(1_2q/3))$ ,  $\varphi$  — угол, откладываемый от направления  $[111]$  и описывающий вращение вектора намагниченности в МНО.

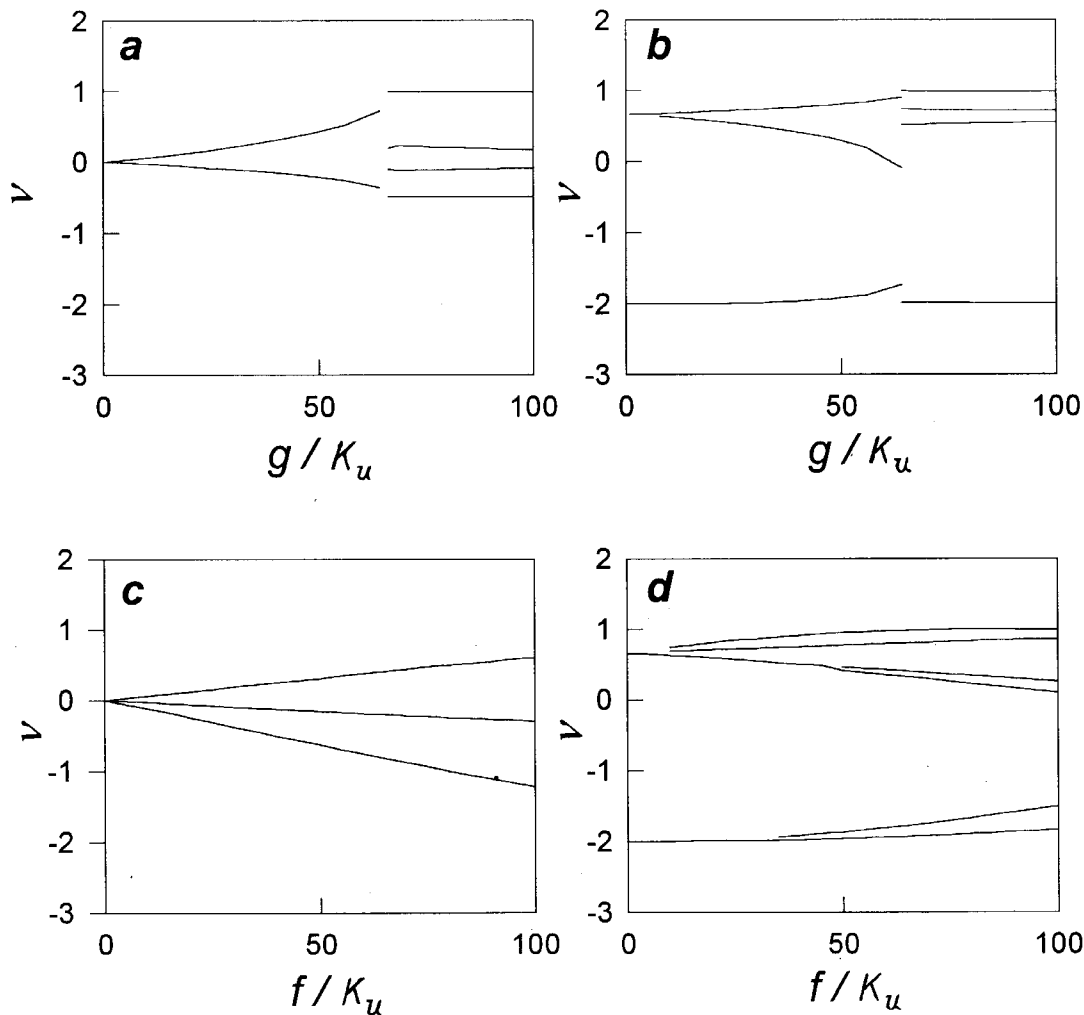
Полученные решения позволяют определить влияние наведенной анизотропии и магнитного поля на структуру МНО. На рис. 1 представлены структуры МНО, возникающие на месте стабилизации  $180^\circ$  блоховской ДГ, при различных параметрах  $g$  и  $f$ . Структура МНО обусловлена особенностями наведенной анизотропии, которая для данной плоскости разворота вектора намагниченности может быть представлена как орторомбическая анизотропия с пространственно зависимыми параметрами, а значит, и с пространственно изменяемыми легкими осями. Увеличение констант  $f$  и  $g$  ( $0 < g < 66$ ) наведенной анизотропии, стабилизирующей  $180^\circ$  блоховскую ДГ, приводит к увеличению амплитуды (угла максимального отклонения от направления  $[111]$ ) МНО. Увеличение внешнего магнитного поля уменьшает амплитуду МНО. В области значений  $g > 66$  существует новое решение, при котором амплитуда МНО скачкообразно увеличивается, и вектор намагниченности в центре МНО ориентируется вдоль направления, близкого к  $[11\bar{1}]$  (кривая 2

на рис. 1). Постоянное магнитное поле, приложенное вдоль  $[111]$ , уменьшает угол максимального отклонения в МНО. Для магнитных неоднородностей, образованных на месте стабилизации  $180^\circ$  ДГ наведенной анизотропией с  $g > 66$ , увеличение постоянного магнитного поля может вызвать переход между решениями, описываемыми МНО с малой (кривая 1 на рис. 1) и большой амплитудой (кривая 2 на рис. 1).

Рассмотрим теперь форму линий поглощения ЯМР  $0^\circ$  ДГ для трех групп ядер с ориентациями оси анизотропии локального магнитного поля вдоль ребер кубической кристаллической решетки и четырех групп — вдоль пространственных диагоналей (ядра железа в  $d$ - и  $a$ -позициях феррита-граната). Поглощение на участке ДГ  $[y, y + dy]$  пропорционально квадрату амплитуды переменной составляющей локального магнитного поля на ядре. Форма линия поглощения ЯМР в этом случае будет иметь вид

$$P(\nu) \propto \sum_i \int_{-\infty}^{+\infty} \langle \Delta\varphi^2 \rangle dy / (\Delta^2 + (\nu_i(y) - \nu)^2), \quad (4)$$

где  $i = 1, 2, 3, 4, (1, 2, 3)$  для  $a$ -мест ( $d$ -мест),  $\Delta^2 = 10^{-4}$  ( $\Delta^2 = 10^{-3}$ ) для  $a$ -мест ( $d$ -мест),  $\nu$  — частота радиочастотного поля  $h'$ ,  $\langle \Delta\varphi^2 \rangle$  — средний за период колебаний радиочастотного поля квадрат изменения угла ориентации вектора намагниченности в МНО. Анизотропная составляющая локального магнитного поля



**Рис. 3.** Зависимости частот максимумов поглощения от констант наведенной анизотропии  $g$  ( $a, b$ ) и  $f$  ( $c, d$ ) для тетраэдрических ( $a, c$ ) и октаэдрических ( $b, d$ ) подрешеток. Кривые рассчитаны при  $q = 100$ ,  $h'/K_u = 0.1$ .

является малой, что позволяет записать зависимость частоты ЯМР от ориентации магнитного момента в виде

$$\nu_i(y) = 1 - 3 \cos^2 \Phi_i, \quad (5)$$

где  $\Phi_i$  — угол между  $i$ -й локальной осью анизотропии на ядре и направлением намагниченности в МНО,  $\nu_i(y)$  — приведенная частота.

Известно [1], что основной вклад в формирование максимумов поглощения ЯМР магнитных неоднородностей вносят участки границы с максимумом спектральной плотности, т.е. для которых  $d\nu_i(y)/dy = 0$ . Поскольку с увеличением констант наведенной анизотропии в магнитной неоднородности увеличиваются углы максимального отклонения от направления [111], то это приводит к изменению зависимости частоты по ширине МНО.

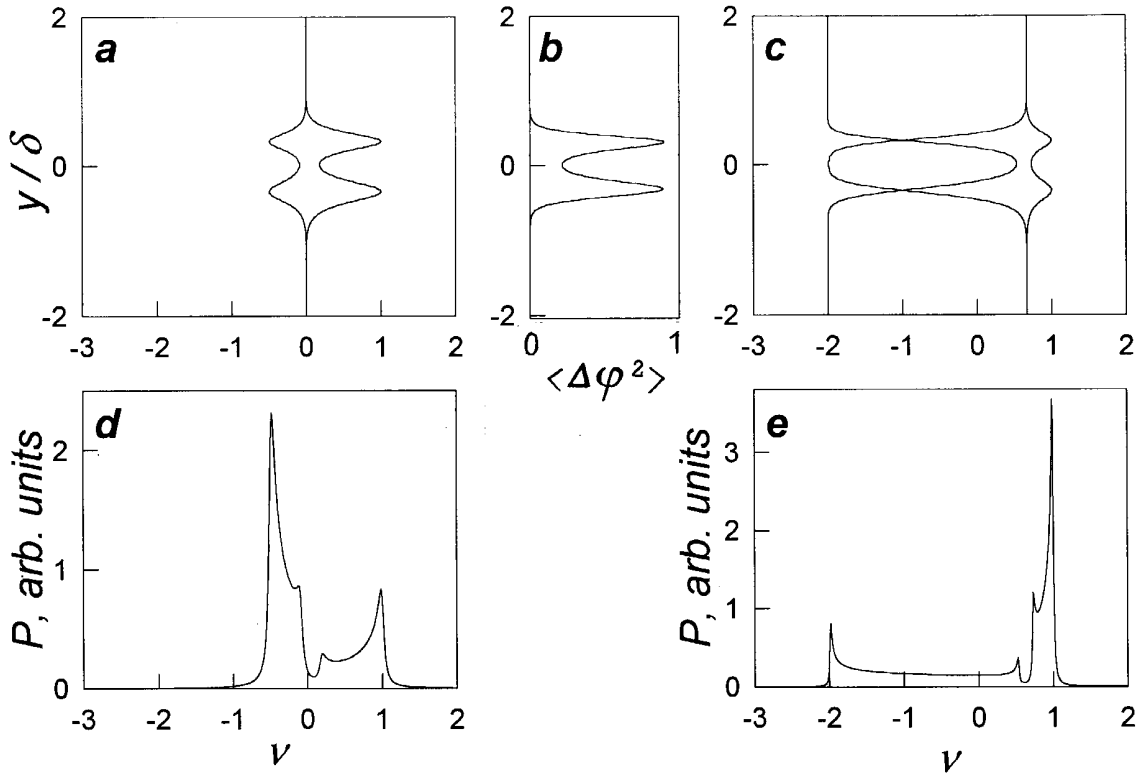
Сигналы ЯМР однородно намагниченного вдоль направления [111] объема ( $f = 0$  и  $g = 0$ ) от тетраэдрических позиций ядер железа формируются на  $\nu = 0$ , а от октаэдрических — на  $\nu = -2$  и  $\nu = 2/3$  [5,6]. Влияние наведенной анизотропии на ЯМР-сигналы МНО

от мест стабилизации  $180^\circ$  ДГ проявляется в расщеплении сигналов и изменении амплитуды поглощения. Рассмотрим влияние компонент наведенной анизотропии на сигналы ЯМР.

$g$ -компонента. Проанализируем две области изменения  $g$ :  $0 < g < 66$  и  $66 < g < 100$ .

1.  $0 < g < 66$ ,  $f = 0$ . На рис. 2,  $b$  видно, что максимум  $\langle \Delta\varphi^2 \rangle$  приходится на центральный участок МНО. Это связано с тем, что при данном значении константы анизотропии  $g$  вектор намагниченности в центральной части МНО направлен вдоль промежуточного кристаллографического направления. Поэтому небольшое по амплитуде магнитное поле приводит к значительному изменению ориентации намагниченности в центре МНО.

Пространственная зависимость ориентации вектора намагниченности в МНО приводит в соответствии с (5) к зависимости частоты  $\nu_i(y)$  по ширине неоднородности (рис. 2,  $a$  и 2,  $c$ ). Поскольку исследуемая неоднородность является неоднородностью типа  $0^\circ$  ДГ, то максимум

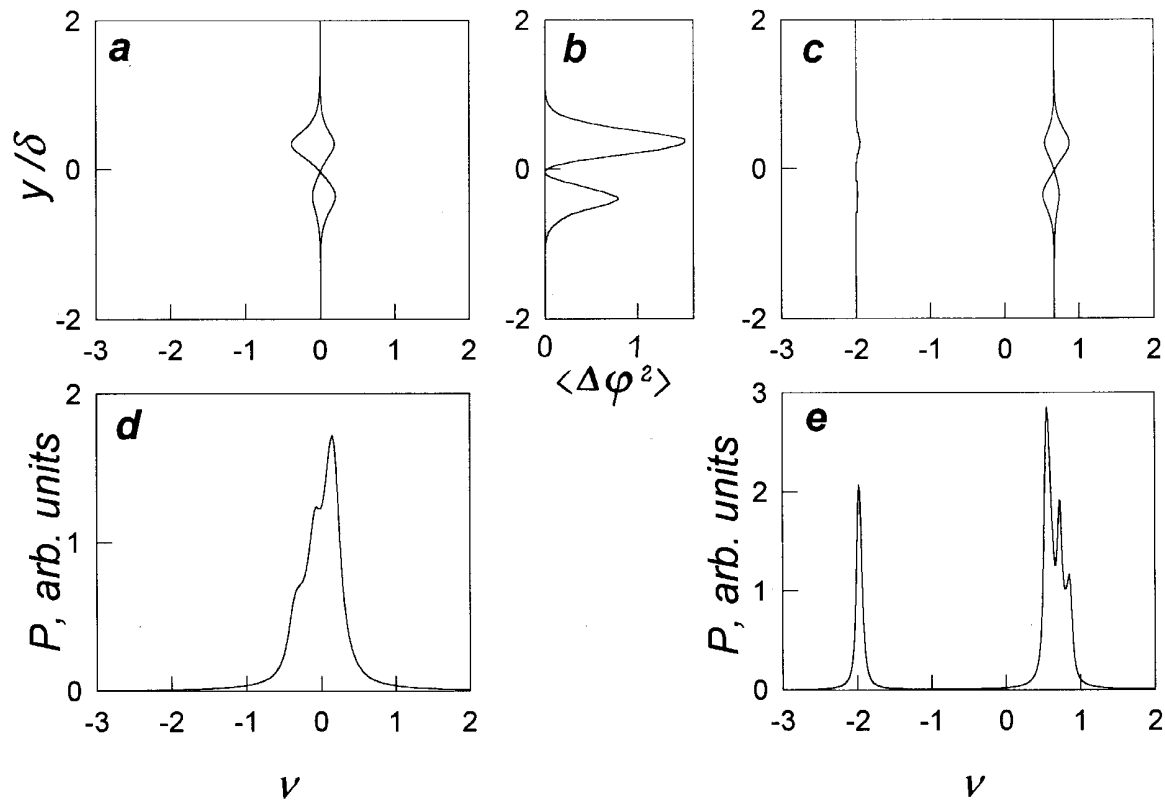


**Рис. 4.** Изменение частоты (*a, c*) и  $\langle \Delta\varphi^2 \rangle$  (*b*) по ширине магнитной неоднородности и формы линий поглощения ЯМР (*d* — для тетраэдрических позиций; *e* — для октаэдрических позиций). Кривые *a-e* рассчитаны при  $g = 70$ ,  $f = 0$ ,  $q = 100$ ,  $h'/K_u = 0.1$ .

спектральной плотности всегда будет приходится на слой с максимальным углом отклонения от направления вектора намагниченности в основном объеме образца. Таким образом, все максимумы поглощения от *a*- (рис. 2, *d*) и *d*-позиций (рис. 2, *e*) формируются центральным слоем МНО. Увеличение  $g$  приводит, как было сказано выше, к увеличению максимального угла отклонения в МНО и, следовательно, к изменению частот максимумов ЯМР поглощения (рис. 3, *a* и 3, *b*). Увеличение изменения центрального слоя МНО с возрастанием  $g$  приводит к возрастанию амплитуды поглощения ЯМР на всех резонансных частотах как для *a*-, так и для *d*-подрешеток.

2.  $66 < g < 100$ ,  $f = 0$ . В этой области значений  $g$  в центральной части МНО вектор намагниченности ориентируется вдоль направлений, близких к  $[11\bar{1}]$ . Действие магнитного РЧ-поля вызывает малые изменения в центре МНО по сравнению со слоями с направлением намагниченности вдоль  $[110]$  (рис. 4, *b*). На рис. 4, *a* и 4, *c* видно, что условие максимума спектральной плотности выполняется для 4-х частот в *d*- и *a*-подрешетках. Соответствующие спектры ЯМР (рис. 4, *d* и 4, *e*) состоят из 4 максимумов поглощения. На рис. 3, *a* и 3, *b* частоты максимумов поглощения с ростом  $g$  (для рассматриваемой области значений) практически не меняются, что связано с незначительным изменением структуры МНО. Амплитуды максимумов на всей полосе поглощения для *a*- и *d*-позиций уменьшаются, что обусловлено абсолютным уменьшением  $\langle \Delta\varphi^2 \rangle$ .

$f$ -компонента ( $g = 0$ ). Более сложная структура МНО, образованной на месте стабилизации  $180^\circ$  ДГ наведенной анизотропией с компонентой  $f$  (кривая 3 на рис. 1), приводит к сложным зависимостям частоты и  $\langle \Delta\varphi^2 \rangle$  по ширине неоднородности. Пространственная зависимость  $\langle \Delta\varphi^2 \rangle$  имеет два максимума и минимум, соответствующий изменению ориентации намагниченности в центре МНО (рис. 5, *b*). На рис. 5, *a* и 5, *c* представлены  $\nu_i(y)$  для *d*- и *a*-подрешеток соответственно. Спектр *d*-позиций (рис. 5, *d*) состоит из трех максимумов, причем полоса поглощения расширяется с увеличением  $f$  (рис. 3, *c*), а амплитуды максимумов поглощения увеличиваются (в интервале значений  $f \in [0; 100]$ ). В  $\nu_i(y)$  для *a*-подрешеток существуют семь частот, для которых выполняется условие максимума спектральной плотности. Для центрального слоя МНО (частота  $\nu = -2$ ) выполняется условие максимума спектральной плотности, но, так как в центре МНО  $\langle \Delta\varphi^2 \rangle = 0$ , сигнал не проявляется. Форма линии поглощения *a*-позиций ядер железа от МНО состоит из четырех максимумов поглощения. Максимум на левом краю полосы поглощения, а также сигнал с наибольшей амплитудой поглощения состоят из двух близких по частоте сигналов. С увеличением  $f$  происходит небольшое смещение полосы поглощения в сторону увеличения частот (рис. 3, *d*) и расщепление сигналов. Амплитуды максимумов поглощения при этом возрастают на всех резонансных частотах, а также происходит изменение соотношений между максимумами.



**Рис. 5.** Изменение частоты (*a, c*) и  $\langle \Delta\varphi^2 \rangle$  (*b*) по ширине магнитной неоднородности и формы линий поглощения ЯМР (*d* — для тетраэдрических позиций; *e* — для октаэдрических позиций). Кривые *a-e* рассчитаны при  $g = 0$ ,  $f = 30$ ,  $q = 100$ ,  $h'/K_u = 0.1$ .

При приложении постоянного магнитного поля, параллельного намагниченности в основном объеме образца, уменьшаются углы отклонения намагниченности в магнитной неоднородности и, как следствие этого, изменяются резонансные частоты максимумов поглощения. Для МНО, образованных от мест стабилизации  $180^\circ$  ДГ компонентой  $f$  ( $g = 0$ ) или  $g$  ( $0 < g < 66$ ,  $f = 0$ ), характерно уменьшение  $\langle \Delta\varphi^2 \rangle$  по всей ширине МНО и уменьшение амплитуды поглощения на всех резонансных частотах. Для МНО, образованной от места стабилизации  $180^\circ$  ДГ компонентой  $g$  в области значений  $66 < g < 100$  ( $f = 0$ ) характерно резкое увеличение  $\langle \Delta\varphi^2 \rangle$  по ширине неоднородности, а значит, и увеличение амплитуды по всей полосе поглощения ЯМР. При увеличении амплитуды внешнего поля для этой области  $g$  начинает проявляться максимум на  $\nu = -2$ , что связано с двумя причинами: увеличением ширины приграничного слоя с  $\nu = -2$  и увеличением  $\langle \Delta\varphi^2 \rangle$  для этого слоя.

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы. На местах стабилизации  $180^\circ$  ДГ возникают МНО типа  $0^\circ$  ДГ, структура которых зависит как от компонент наведенной анизотропии, так и от напряженности постоянного магнитного поля. Спектры ЯМР магнитных неоднородностей отличаются от спектров ЯМР однородно намагниченного образца и образца, содержащего блоховские ДГ [7–9]. Форма линий

ЯМР сигналов магнитных неоднородностей для *a*- и *d*-подрешеток определяется величиной компонент  $f$  и  $g$  наведенной анизотропии и напряженностью постоянного магнитного поля.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (96-02-19255).

## Список литературы

- [1] G.A. Murray, W. Marshall. Proc. Phys. Soc. **86**, 315 (1965).
- [2] Е.А. Туров, А.П. Танкеев, М.И. Куркин. ФТТ **28**, 3, 385 (1969).
- [3] Е.А. Туров, А.П. Танкеев, М.И. Куркин. ФТТ **29**, 4, 747 (1970).
- [4] В.Г. Веселаго, И.В. Владимиров, Р.А. Дорошенко. Тр. ИОФАН **44**, 92 (1993).
- [5] В.А. Бородин, В.Д. Дорошев, В.А. Ключан, Н.М. Ковтун, Р.З. Левитин, А.С. Маркосян. ЖЭТФ **70**, 4, 1363 (1976).
- [6] F. Boutron, C. Robert. Compt. Rend. **253**, 433 (1961).
- [7] Р.А. Дорошенко, С.В. Серегин, Р.С. Фахретдинова. В сб.: Статика и динамика упорядоченных сред. Уфа (1994). 54 с.
- [8] Р.А. Дорошенко, С.В. Серегин, Р.С. Фахретдинова. ФТТ **38**, 12, 3642 (1996).
- [9] С.В. Серегин, Р.А. Дорошенко, Р.С. Фахретдинова. Письма в ЖЭТФ **50**, 3, 130 (1989).