

Влияние процессов стабилизации на сигналы ЯМР 180° доменных границ 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

(Поступила в Редакцию 15 сентября 1997 г.)

Численным методом исследовано влияние процессов стабилизации на форму линии ЯМР 180° доменной границы в кубических кристаллах феррита-граната с учетом изменения структуры границы при ее квазистатическом смещении в магнитном поле. Проведен анализ зависимости амплитуд максимумов поглощения от констант наведенной анизотропии и амплитуды внешнего магнитного поля.

До сих пор анализ сигналов ЯМР ядер, локализованных в объеме доменных границ (ДГ) магнитоупорядоченных кристаллов, проведен лишь для материалов с пространственно однородными параметрами, определяющими структуру границы. При этом предполагается [1,2], что структура ДГ при ее движении в переменном радиочастотном магнитном поле не изменяется и совпадает со структурой покоящейся ДГ. Однако стабилизация ДГ, закрепление ДГ на дефектах кристаллической структуры, нарушающие пространственную однородность, приводят к зависимости структуры ДГ от ее положения в пространстве.

В настоящей работе мы исследовали влияние процессов стабилизации на форму линии ЯМР 180° блоховской ДГ в кубических кристаллах с комбинированной магнитной анизотропией. Рассмотрены зависимости формы линии ЯМР ДГ от величины констант наведенной анизотропии (НА) и амплитуды переменного магнитного поля. Сигналы ЯМР ДГ рассчитывались численно с учетом изменения структуры ДГ при ее квазистатическом смещении в магнитном поле.

Наличие стабилизации приводит к необходимости учета в плотности энергии ДГ членов, явно зависящих от пространственной координаты. Поэтому описать структуру стабилизированной ДГ аналитическим выражением невозможно. Для расчета структуры ДГ использовался метод, предложенный в работе [3], суть которого заключается в том, что уравнение, описывающее вращение вектора намагниченности в одномерных магнитных неоднородностях,

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

разлагается в ряд Тейлора вблизи его приближенного решения в виде

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

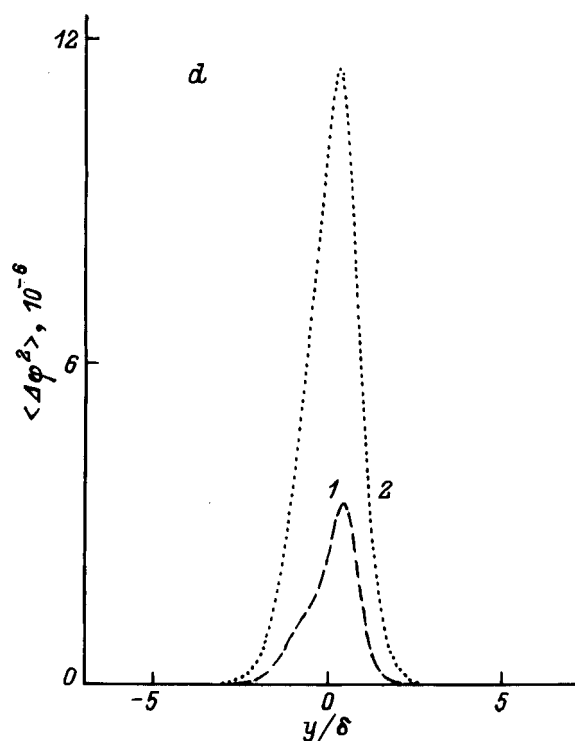
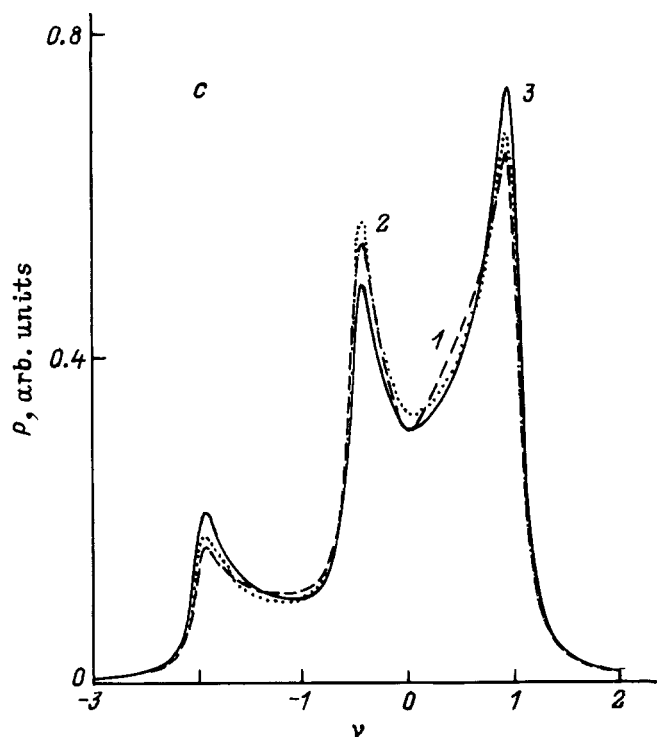
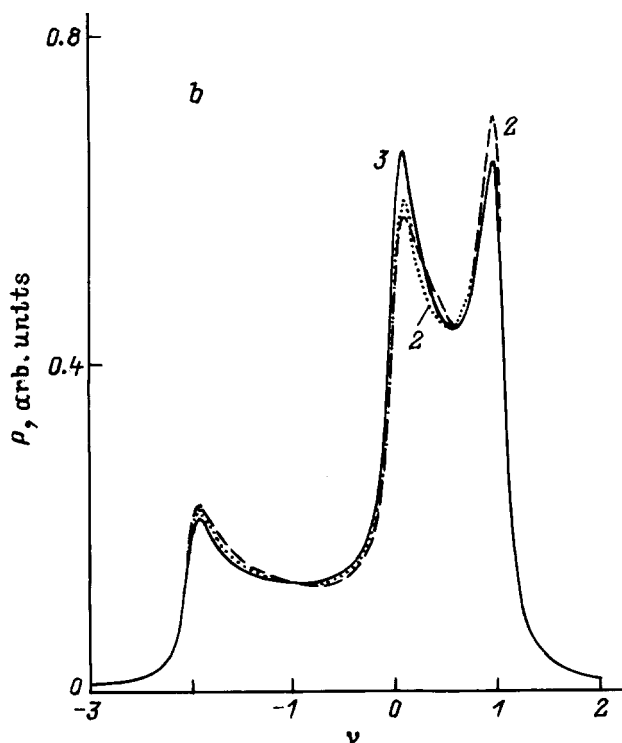
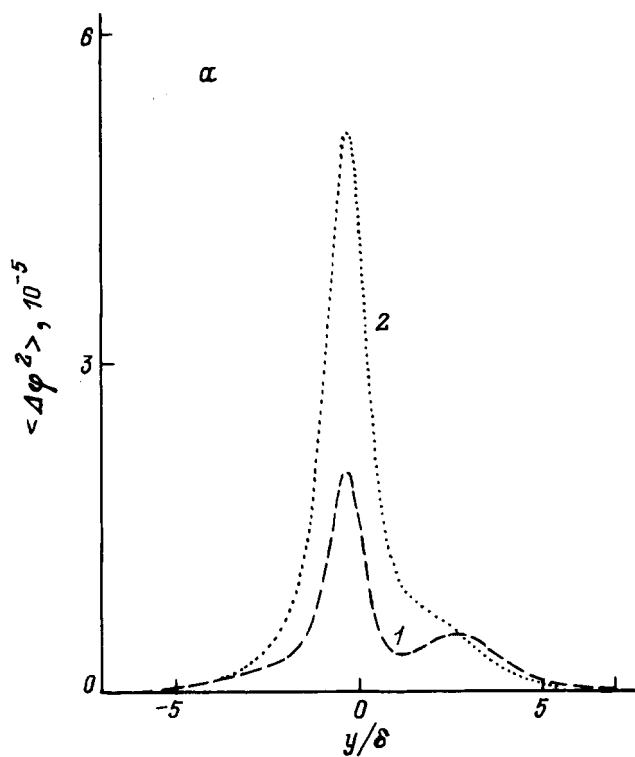
где φ_n — приближенное решение уравнения. Представляя производные в виде конечных разностей, получим систему линейных алгебраических уравнений с

трехдиагональной матрицей, которая решается методом прогонки. Полученное решение представляет распределение направлений вектора намагниченности в ДГ. Направления намагниченности в доменах совпадали с направлениями $[111]$ и $[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$ соответственно, т.е. краевые условия задачи имеют вид $\varphi(-\infty) = 0$, $\varphi(+\infty) = \pi$, $\varphi'(\pm\infty) = 0$. Поскольку ДГ — $(1\bar{1}0)$. В плотности энергии ДГ учитывались следующие члены: энергии кубической анизотропии ($K_1 < 0$) и одноосной анизотропии (K_u), снимающей вырождение кубических осей (с осью симметрии вдоль $[111]$), обменная энергия (A), энергия смещающего ДГ внешнего магнитного поля (h^*) и энергии наведенной анизотропии (F, G):

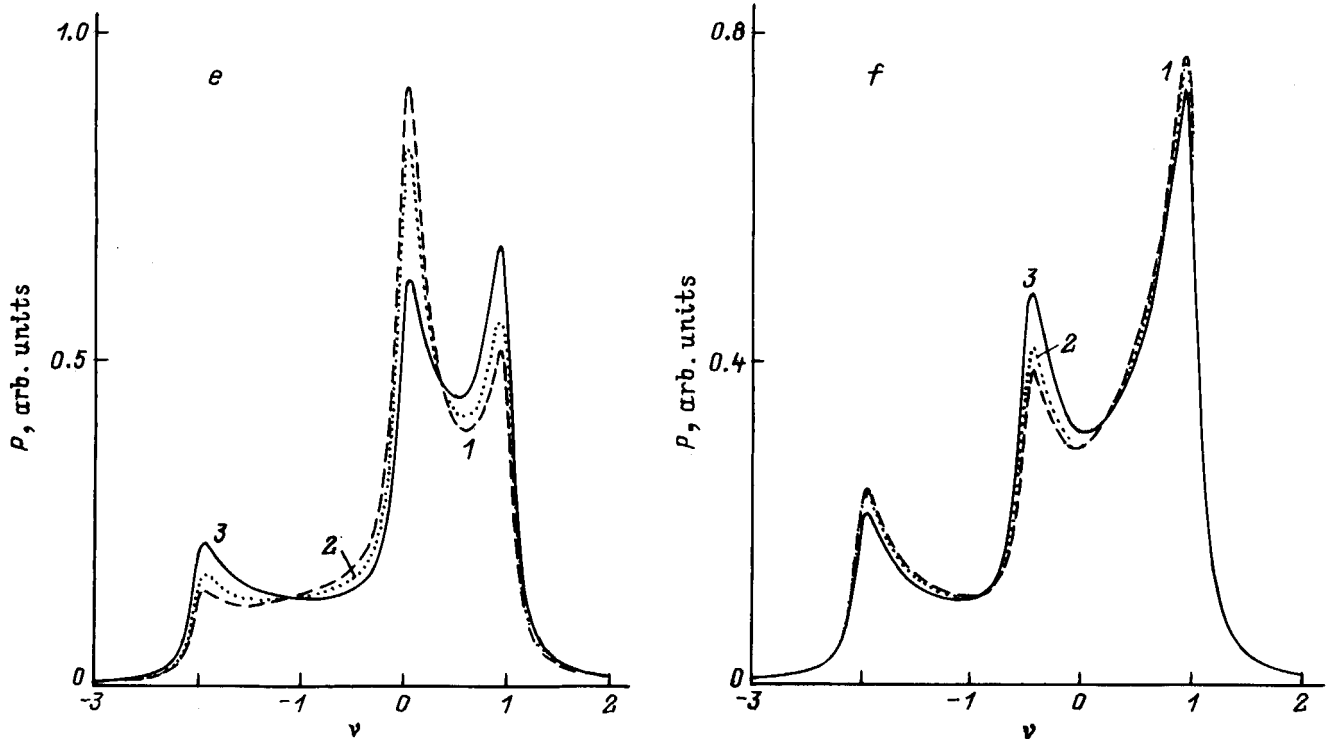
$$e_{DW}/K_u = -q \left(\frac{\sin^4 \varphi}{4} + \frac{\cos^4 \varphi}{3} - \frac{\sqrt{2}}{3} \sin^3 \varphi \cos \varphi \right) + \sin^2 \varphi - h \cos \varphi + a(\varphi')^2 - f \sum_i \alpha_i^2 \beta_i^2 - g \sum_{i \neq j} \alpha_i \alpha_j \beta_i \beta_j, \quad (3)$$

где $q = |K_1|/K_u$, $h = h^*/K_u$, $a = A/K_u$, $f = F/K_u$, $g = G/K_u$, α_i — направляющие косинусы вектора намагниченности, β_i — направляющие косинусы вектора намагниченности в исходной (до стабилизации) ДГ, φ — угол, откладываемый от направления $[111]$ и описывающий вращение вектора намагниченности в ДГ.

Полученные решения позволяют определить влияние наведенной анизотропии и магнитного поля на структуру ДГ. Рассмотрены два предельных случая: 1) кубическая анизотропия мала по сравнению с одноосной, т.е. $q \rightarrow 0$ (псевдоодноосные кристаллы); 2) одноосная анизотропия мала по сравнению с кубической ($q \gg 1$). Вне зависимости от величины q компонента наведенной анизотропии с константой F при стабилизации ДГ приводит к закреплению участков границы с направлением спинов вдоль кристаллографических направлений $\langle 100 \rangle$ и в меньшей степени $\langle 110 \rangle$. Аналогично компонента НА с константой G приводит к закреплению участков границы вдоль направлений $\langle 111 \rangle$. При этом в первом случае ($q \rightarrow 0$) в структуре ДГ появляются участки с более медленным изменением направления вектора намагниченности. С увеличением F и G ярко проявляется



Изменение квадрата коэффициента усиления $\langle \Delta\varphi^2 \rangle$ по толщине ДГ (a, d) и форма линии поглощения ЯМР ДГ при $q = 0, h = 0.01$ для октаэдрических позиций (b, e) и тетраэдрических позиций (c, f). Кривые a-c рассчитаны при $g = 0$ для $f = 5$ (1), 3 (2), 0.1 (3), кривые d-f — при $f = 0$ для $g = 10$ (1), 5 (2), 0.1 (3).



(Продолжение рисунка).

неодинаковость изменения отдельных участков ДГ, что видно из рисунков, *a* и *d*. Во втором случае ($q \gg 1$) в структуре исходной (нестабилизированной) ДГ уже существует область с более медленным изменением ориентации вектора намагниченности вблизи направления $\mathbf{M} \parallel [111]$. НА изменяет в основном эту область. Компонента НА с константой F уменьшает ее, а с константой G — увеличивает. При этом характер смещения ДГ во внешнем магнитном поле сильно отличается от предыдущего случая. 180° границу можно разбить на две составляющие: 71° и 109° , которые в зависимости от компоненты НА по-разному смещаются при действии поля. При этом максимумы изменений приходятся на участки ДГ, соответствующие центрам составляющих компонент 180° ДГ.

Рассмотрим теперь форму линий ЯМР ДГ для трех групп ядер с ориентациями оси анизотропии локального магнитного поля вдоль ребер кубической кристаллической решетки и для четырех групп с ориентациями оси вдоль пространственных диагоналей куба (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 линии поглощения ЯМР в этом случае будет иметь вид

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

где $i = 1, 2, 3, 4$ (1,2,3) для *a*-мест (*d*-мест), N — нормировочный коэффициент ($\int P d\nu = 1$), $\Delta = 10^{-1}$,

ν — частота радиочастотного поля h^* , $\langle \Delta\varphi^2 \rangle$ — средний за период колебаний квадрат изменения угла ориентации вектора намагниченности при квазистатическом смещении ДГ в результате действия поля h^* . Анизотропная составляющая локального магнитного поля является малой, что позволяет записать зависимость частоты ЯМР от ориентации магнитного момента в виде $\nu_i(\varphi) = 1 - 3 \cos^2 \Phi_i$, где Φ_i — угол между *i*-ой локальной осью анизотропии на ядре и направлением намагниченности в ДГ, $\nu_i(\varphi)$ — приведенная частота.

Известно [4], что основной вклад в формирование максимумов поглощения ЯМР ДГ вносят участки границы с максимумом спектральной плотности, т.е. те, для которых $d\nu_i(\varphi)/d\varphi = 0$. Для *a*-позиций ядер железа основной вклад в максимум на частоте $\nu = -2$ приходится на участки с направлениями намагниченности, близкими к $\langle 111 \rangle$, на частоте $\nu = 0$ — к направлению $\langle 100 \rangle$, на частоте $\nu = 1$ — к направлениям $\langle 011 \rangle$, $\langle 112 \rangle$; для *d*-позиций ядер железа основной вклад в максимум на частоте $\nu = -2$ приходится на участки с направлением намагниченности близким к $\langle 100 \rangle$, на частоте $\nu = -0.5$ — к направлению $\langle 011 \rangle$, на частоте $\nu = 1$ — к направлениям $\langle 100 \rangle$ и $\langle 011 \rangle$.

Установлено, что процессы стабилизации приводят к изменению структуры ДГ, неоднородному изменению участков ДГ в магнитном поле. Увеличение констант НА ведет к абсолютному уменьшению поглощения ЯМР ДГ на всех частотах и к изменению соотношений амплитуд максимумов поглощения. Абсолютная интенсивность сигнала при увеличении амплитуды внешнего магнитного поля возрастает, частоты максимумов поглощения при

этом не меняются и соответственно равны -2 , 0 , 1 для a -позиций и -2 , -0.5 , 1 для d -позиций.

1) $q = 0$.

a -позиции. На рисунках, b и e представлены формы линии поглощения ЯМР ядер железа в a -позициях кристаллической решетки граната. Хорошо видно, что увеличение F ведет к изменению соотношений между амплитудами максимумов поглощения на частотах $\nu = 0$, 1 и -2 (уменьшение на частоте $\nu = 0$ и увеличение на частотах $\nu = 1$ и -2) (см. рисунок, b). Увеличение G (см. рисунок, e) способствует росту амплитуды максимума поглощения на частоте $\nu = 0$ и подавлению на частотах $\nu = -2$ и 1 .

d -позиции. В форме линии поглощения ЯМР ядер железа в d -позициях при увеличении F наблюдается относительное уменьшение амплитуд на частотах $\nu = 1$ и -2 (см. рисунок, c). На частоте $\nu = -0.5$ амплитуда максимума сначала возрастает, а затем уменьшается, что связано с образованием в структуре ДГ участков более медленного изменения направления вектора намагниченности (кривая I на рисунке, a). При увеличении G амплитуды максимумов поглощения на частотах $\nu = 1$ и -2 увеличиваются незначительно и сильно уменьшаются на частоте $\nu = -0.5$ (см. рисунок, f).

При фиксированных значениях F и G ($F = \text{const}$ и $G = 0$, $G = \text{const}$ и $F = 0$) увеличение амплитуды приложенного внешнего поля практически не изменяет соотношения амплитуд максимумов поглощения. Исключение составляет случай больших значений параметра F ($f \sim 10$) и больших смещений ДГ ($> \delta$). При этом на месте стабилизации ДГ возникают магнитные неоднородности типа 0° ДГ [3], которые могут существенно изменить спектр ЯМР. Однако этот случай является предметом отдельного исследования и в данной работе рассматриваться не будет.

2) $q = 100$.

a -позиции. Как и в псевдоодноосном случае, увеличение констант НА F и G при фиксированном значении магнитного поля изменяет соотношение амплитуд максимумов поглощения. При малых значениях констант НА изменения в форме линии поглощения носят одинаковый характер: амплитуда на частоте $\nu = 0$ сначала возрастает, а затем, с увеличением констант F или G , уменьшается. Несмотря на схожее проявление действия компонент НА, механизм из воздействия различен. Как уже было сказано выше, изменение величины максимума поглощения определяется спектральной плотностью спинов и локальным коэффициентом усиления. При малых значениях F незначительно увеличивается число спинов с направлениями, близкими к $[100]$. Граница закреплена слабо, т.е. изменение ориентаций спинов участка ДГ с направлениями, близкими к $[100]$, велико. Все это приводит к росту амплитуды максимума поглощения на частоте $\nu = 0$. Возрастание F увеличивает спектральную плотность спинов на частоте $\nu = 0$, но эффект закрепления данного участка ДГ является более сильным, что приводит к уменьшению амплитуды максимума поглощения на данной частоте. Компонента НА с

константой G уменьшает число спинов с направлениями, близкими к $[100]$, но при этом дестабилизирует участок ДГ с соответствующими направлениями спинов (т.е. увеличивает локальный коэффициент усиления). В области малых G увеличение G приводит к незначительному уменьшению спектральной плотности на частоте $\nu = 0$. Более существенно проявляется дестабилизация этого участка ДГ, что также приводит к возрастанию амплитуды максимума поглощения на $\nu = 0$. В области больших значений увеличение G сильно уменьшает спектральную плотность, при этом амплитуда максимума поглощения на частоте $\nu = 0$ уменьшается.

Увеличение как F , так и G приводит к монотонному возрастанию амплитуды максимума на частоте $\nu = -2$. Амплитуда максимума на частоте $\nu = 1$ сильно возрастает при увеличении F и практически не меняется при увеличении G .

В отличие от псевдоодноосного случая увеличение внешнего поля при фиксированных значениях F и G ($F = \text{const}$ и $G = 0$, $G = \text{const}$ и $F = 0$) изменяет соотношение амплитуд максимумов поглощения. Мы рассмотрели влияние поля на форму линии поглощения ЯМР для различных значений констант НА (f или g изменялись в пределах $1-100$). Из полученных спектров можно сделать следующие выводы: увеличение амплитуды внешнего магнитного поля приводит к относительному уменьшению амплитуды максимума поглощения на частоте $\nu = -2$. Для амплитуды максимума поглощения на частоте $\nu = 0$ также характерна тенденция уменьшения с ростом поля. Исключение составляет случай $G = 10$ и $F = 0$, для которого наблюдается немонотонное изменение амплитуды максимума (небольшое возрастание, а затем уменьшение). Это связано с тем, что в малых полях центр стабилизированной ДГ (направление намагниченности $[\bar{1}11]$) изменяется менее, чем участок ДГ с направлениями намагниченности, близкими к $[100]$, что соответствует эффективному возрастанию коэффициента усиления этого участка. С увеличением поля ДГ смещается как целое, что приводит к эффективному уменьшению коэффициента усиления указанного участка ДГ. В спектре поглощения ЯМР этому соответствует небольшое увеличение и затем уменьшение амплитуды $P_{\nu=0}$. Амплитуда максимума поглощения на частоте $\nu = 1$ изменяется незначительно, за исключением случая больших значений параметра $F = 100$, $G = 0$, когда наблюдается увеличение амплитуды $P_{\nu=1}$.

Необходимо отметить также различия в спектрах поглощения ЯМР ДГ, стабилизированных различными компонентами НА. При малых значениях констант G и F формы линии поглощения ЯМР совпадают, наибольший максимум соответствует частоте $\nu = 0$. Совпадение форм линий поглощения обусловлено незначительностью изменений структуры ДГ. Однако уже при значениях констант НА, составляющих 10% от величины константы кубической анизотропии, различия в спектрах поглощения становятся существенными. Спектр ДГ, стабилизированной компонентой НА с константой F , имеет

наибольший максимум на частоте $\nu = 1$, а для ДГ, стабилизированной компонентой НА с константой G , максимум наблюдается при $\nu = 0$.

d -позиции. Отдельные изменения амплитуд максимумов поглощения имеют следующий характер: с увеличением констант F или G амплитуда на частоте $\nu = 1$ сначала возрастает, а затем уменьшается; на частоте $\nu = -0.5$ сильно возрастает с увеличением F и незначительно увеличивается с ростом G ; на частоте $\nu = -2$ сначала возрастает, а затем сильно уменьшается при увеличении F и незначительно уменьшается при увеличении G . Причина немоного изменения амплитуд максимумов поглощения связаны с особенностями изменения структуры ДГ при стабилизации и действии магнитного поля и были объяснены ранее.

При малых значениях констант G и F изменения структуры ДГ незначительны, и формы линии поглощения ЯМР совпадают. Наибольший максимум соответствует частоте $\nu = 1$. При увеличении констант НА различия в спектрах поглощения становятся существенными. Спектр ДГ, стабилизированной компонентой НА с константой F ($f = 60$), имеет наибольший максимум на частоте $\nu = -0.5$, а для ДГ, стабилизированной компонентой НА с константой G ($g = 60$), $\nu = 1$.

При постоянных значениях F ($F = \text{const}$, $G = 0$) или G ($G = \text{const}$, $F = 0$) увеличение амплитуды внешнего магнитного поля приводит к относительному уменьшению амплитуд максимумов поглощения на фоне абсолютного возрастания интенсивности сигнала. Исключения составляют случаи $F = 10$, $G = 0$ и $G = 100$, $G = 0$, когда изменения амплитуды максимума поглощения на частоте $\nu = -0.5$ незначительны. Основная тенденция относительного уменьшения амплитуд максимумов поглощения с ростом поля связана с уменьшением коэффициента усиления участков ДГ, вносящих основной вклад в формирование максимумов поглощения, по сравнению с коэффициентом усиления в центре ДГ.

Таким образом, исследование влияния процессов стабилизации ДГ на форму линии ЯМР показало необходимость учета изменения структуры ДГ при ее смещении с места стабилизации. В спектре поглощения ЯМР формируются три максимума на частотах -2 , 0 , 1 для a -позиций и -2 , -0.5 , 1 для d -позиций, что совпадает с выводами работы [5], где были получены спектры для ДГ с аналитически определяемой структурой. Увеличение констант НА приводит к абсолютному уменьшению интенсивности поглощения на всей полосе поглощения и относительному изменению амплитуд максимумов поглощения.

Различие действия компонент НА с константами F и G на относительное изменение амплитуд максимумов поглощения наиболее ярко проявляется в случае псевдооднососного кристалла ($q = 0$). Для a -позиций увеличение константы F приводит к уменьшению амплитуды поглощения на частоте $\nu = 0$ и увеличению амплитуд максимумов на частотах $\nu = -2$ и 1 . Увеличение G

даёт обратный эффект: амплитуда поглощения на $\nu = 0$ возрастает, а на $\nu = -2$ и 1 — падает. Для d -позиций увеличение F приводит к относительному уменьшению амплитуд на частотах $\nu = 1$ и -2 . На частоте $\nu = -0.5$ амплитуда максимума сначала возрастает, а затем уменьшается, что связано с образованием в структуре ДГ участков более медленного изменения направления вектора намагниченности. При увеличении G амплитуды максимумов поглощения на частотах $\nu = 1$ и -2 увеличиваются незначительно, и сильно уменьшается на частоте $\nu = -0.5$.

В кристаллах с комбинированной кубической и одноосной анизотропией ($q = 100$) в структуре ДГ существует область с более медленным изменением ориентаций векторов намагниченности с направлениями, близкими к $\mathbf{M} \parallel [\bar{1}11]$. Воздействие НА изменяет эту область. Компонента НА с константой F уменьшает ее, а с константой G увеличивает. При малых значениях F и G слабо проявляются особенности действия компонент НА. Увеличение констант НА приводит к существенным изменениям в структуре ДГ и как следствие к различиям в спектрах поглощения ЯМР. При этом изменения разных участков ДГ при воздействии магнитного поля происходят неодинаковым образом, что приводит к изменению соотношений между амплитудами максимумов поглощения и к зависимости, не связанной с эффектами насыщения, от амплитуды магнитного поля.

Полученные результаты позволяют качественно объяснить фотоиндуцированное изменение ЯМР ДГ, экспериментально наблюдавшееся в иттриевом феррите-гранате [6] и иттриевом ортоферрите [7].

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); **29**, 4, 747 (1970).
- [3] В.Г. Веселаго, И.В. Владимиров, Р.А. Дорошенко. Тр. ИОФАН. Фотомагнетизм **44**, 92 (1993).
- [4] Р.А. Дорошенко, С.В. Серегин, Р.С. Фахретдинова. В сб.: Статика и динамика упорядоченных сред. Уфа (1994). 54 с.
- [5] Р.А. Дорошенко, С.В. Серегин, Р.С. Фахретдинова. ФТТ **38**, 12, 3642 (1996).
- [6] С.В. Серегин, Р.А. Дорошенко, В.А. Тимофеева, Р.С. Фахретдинова. Письма в ЖЭТФ **50**, 3, 130 (1989).
- [7] S. Nadolski. IEEE Trans. Magn. **14**, 5, 912 (1971).