Письма в ЖЭТФ, том 73, вып. 1, стр. 21 – 24 © 2001 г. 10 января

Динамическая устойчивость системы концентрических кольцевых доменов

В. Н. Мальцев[1], *Н. М. Фахрутдинов*

Уральский государственный университет
620083 Екатеринбург, Россия

Поступила в редакцию 22 августа 2000 г.
После переработки 21 ноября 2000 г.

В рамках простой феноменологической модели получены наиболее яркие особенности поведения доменных структур типа "ведущий центр". Показано, что частота внешнего поля является стабилизирующим фактором для таких систем.

PACS: 75.60.Ch

При исследовании феррит-гранатовых пленок с перпендикулярной анизотропией, помещенных в переменное магнитное поле звуковой частоты, было обнаружено возбужденное состояние многодоменной среды, названное ангерным состоянием [1]. В этом состоянии происходит самоорганизация движущихся доменных границ и образование различного вида устойчивых динамических доменных структур (ДДС). Так, например [2, 3], при определенных значениях амплитуды и частоты поля, перпендикулярного к плоскости пленки, на некоторых локальных дефектах образца возникают динамические системы концентрических кольцевых доменов (СККД), распространяющихся от центра с небольшой скоростью. Такую ДДС назвали "ведущим центром" (ВЦ). В образце может одновременно существовать несколько ВЦ, наиболее активный из них может содержать более 30 колец. Скорость изменения радиусов доменных границ и их число в ВЦ зависят от частоты и амплитуды поля.

В настоящее время не существует теории, которая описывала бы процесс образования и развития ВЦ или хотя бы амплитудно-частотную область существования ДДС подобного типа. Статические свойства СККД изучались теоретически в [4, 5].

В настоящей работе для объяснения некоторых особенностей ДДС типа "ведущий центр" предполагается, что существование ВЦ обусловлено, в первую очередь, динамической устойчивостью системы концентрических кольцевых доменов, а не особенностями процессов перемагничивания на дефекте. Тогда амплитудно-частотная область существования ВЦ должна представлять собой область устойчивости СККД. Дефект же является просто источником кольцевых доменов, механизм образования которых представляет самостоятельную задачу, а влияние дефекта на устойчивость СККД еще предстоит выяснить. Таким образом, для получения амплитудно-частотных областей существования ВЦ предлагается исследовать устойчивость систем концентрических кольцевых доменных границ, а не условия перемагничивания на дефекте.

В качестве основы для расчетов была выбрана феноменологическая диссипативная модель. Геометрия задачи показана на рис.1. Предполагалось, что доменные границы (ДГ) имеют нулевую толщину и эффективную массу, которая выражается через массу Деринга. Предполагалось также, что при движении на ДГ действуют: сила трения, пропорциональная скорости движения (вязкое трение) и сила трения, обусловленная взаимодействием ДГ с неоднородностями

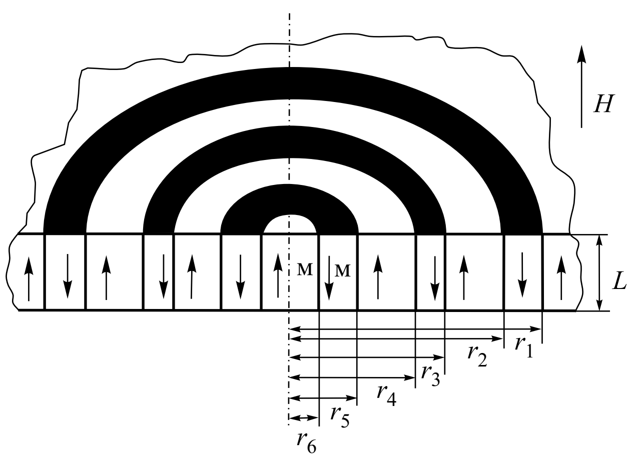

Рис.1

[1] e-mail: vladimir.maltsev@usu.ru

тями и дефектами (коэрцитивная сила). Эти силы выражались через диссипативную функцию следующего вида:

$$\Re = \frac{1}{2}\frac{2M}{\mu}\sum_{k=1}^{N} 2\pi r_k L\left(\frac{dr_k}{dt}\right)^2 + 2MH_c\sum_{k=1}^{N} 2\pi r_k\left|\frac{dr_k}{dt}\right|.$$

Здесь введены следующие обозначения: M – намагниченность, $\mu = \gamma\Delta_0/\alpha$ – подвижность ДГ, α – параметр вязкого затухания, γ – гиромагнитное отношение, $\Delta_0 = \sqrt{A/K}$, A – константа обменного взаимодействия, K – константа одноосной анизотропии, H_c – коэрцитивная сила, N – число ДГ в СККД. Первый член в этом выражении представляет собой диссипативную функцию Рэлея для системы кольцевых ДГ, а второй член описывает трение, связанное с наличием дефектов и неоднородностей, также для системы из N кольцевых ДГ.

Уравнение движения в безразмерном виде для произвольной k-й ДГ было получено из уравнения Лагранжа с учетом диссипации энергии. Переход к безразмерным величинам осуществлялся делением энергий на $(2\pi M)^2 L^3$, введением "безразмерного времени" $\tau = \omega_0 t$ и безразмерных переменных $R_k = r_k/L$. В этих обозначениях диссипативная функция будет иметь следующий вид:

$$\Im = \frac{1}{2}\frac{L\omega_0^2}{\pi M\mu}\sum_{k=1}^{N} R_k(\dot{R}_k)^2 + 4h_c\omega_0\sum_{k=1}^{N} R_k|\dot{R}_k|,$$

где ω_0 – частота внешнего поля, $h_c = H_c/4\pi M$ – приведенная коэрцитивная сила. Кинетическая энергия в лагранжиане определялась формулой

$$T = \frac{Lm_D\omega_0^2}{4\pi M^2}\sum_{k=1}^{N} R_k(\dot{R}_k)^2,$$

а для полной потенциальной энергии изолированной СККД в бесконечной пленке (за вычетом энергии пленки, намагниченной до насыщения) использовалось выражение, приведенное в [5]:

$$U = 2\tilde{l}\sum_{k=1}^{N} R_k - h(\tau)\sum_{k=1}^{N+1} s_k R_k^2 + \sum_{k=1}^{N+1} s_k R_k^2 +$$
$$+\int_0^\infty \frac{1-e^{-x}}{x}\left[\sum_{k=1}^{N+1} s_k R_k J_1(R_k x)\right]^2 dx,$$

где $\tilde{l} = l/L = \sigma_0/2\pi M^2 L$ – приведенная характеристическая длина, σ_0 – плотность энергии ДГ,

$$s_k = \begin{cases} 2(-1)^k, & k \le N, \\ \rho - (-1)^N, & k = N+1, \end{cases}$$

а $\rho = M_{\text{def}}/M$ – "магнитный заряд" дефекта, J_0 и J_1 – функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядков, соответственно, $h(\tau) = H(\tau)/4\pi M$ – приведенное внешнее магнитное поле. В выражении для потенциальной энергии первое слагаемое – граничная энергия, второй член описывает энергию взаимодействия с внешним полем, а оставшиеся слагаемые представляют собой магнитостатическую энергию системы из N концентрических кольцевых доменных границ с неперемагничиваемым дефектом в центре системы.

Было получено следующее уравнение движения для k-й ДГ:

$$\beta_1\left(\ddot{R}_k + \frac{1}{2R_k}(\dot{R}_k)^2\right) + \beta_2 R_k +$$
$$+2h_c\text{sign}(\dot{R}_k) + F_k(R_k,\tau) = 0, \quad (1)$$

где

$$\beta_1 = \frac{L}{\Delta_0}(1+\alpha^2)\left(\frac{1}{4\pi\gamma M}\right)^2, \quad \beta_2 = 2\frac{L}{\Delta_0}\left(\frac{1}{4\pi\gamma M}\right),$$

$$F(R_k,\tau) = \frac{\tilde{l}}{R_k} + s_k\left[1 - h(\tau) + \int_0^\infty \frac{1-e^{-x}}{x} J_0(R_k x)\times\right.$$
$$\left.\times\sum_{n=1}^{N+1} s_n R_n J_1(R_n x)dx\right].$$

В расчетах использовались значения величин $M = 11$ Гс, $L = 10^{-3}$ см, $l = 10^{-4}$ см, $\Delta_0 = 1.3\cdot 10^{-6}$ см, соответствующие экспериментальным [1,2]. Полагая $\gamma \approx 2\cdot 10^7$ (Э·с)$^{-1}$ и $\alpha^2 \approx 0$, находим, что β_1 меньше β_2 на 7 порядков, поэтому члены уравнения (1) с коэффициентом β_1 в первом приближении можно опустить, то есть инерционные эффекты не учитывались. Дальнейшее упрощение модели состояло в исключении из рассмотрения коэрцитивности границ и дефекта в центре структуры. Таким образом, для расчетов использовалось уравнение $\beta_2\dot{R}_k + F_k(R_k,\tau) = 0$, которое решалось численно методом Рунге – Кутта 4-го порядка. Для интегралов вида

$$\int_0^\infty \frac{1-e^{-x}}{x} J_0(ax)J_1(bx)dx$$

использовалась либо вычисленная заранее таблица значений, либо приближенные выражения

$$\frac{1}{\pi}\left[\text{tg}\left(\frac{(a-b)}{3}\frac{2\pi}{3}\right) + \text{tg}\left(\frac{(2a+b)}{3}\frac{2\pi}{3}\right)\right].$$

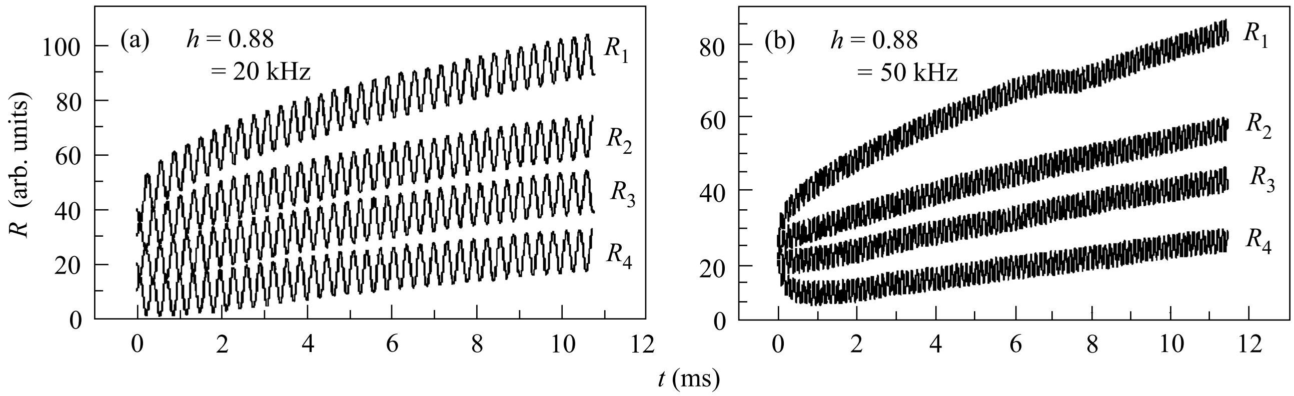

Рис.2. Зависимости приведенных радиусов доменных границ (R) в системе из четырех ДГ от времени (амплитуда поля $h = 0.88$): а) $\omega = 20$ кГц; б) $\omega = 50$ кГц

В расчетах варьировалось число доменных границ N, амплитуда поля h, частота ω_0 и характер изменения поля (синусоидальный, пилообразный), величина параметра β_2.

Первоначально исследовалась динамика СККД с $N = 2$, то есть одного кольцевого домена. Как показывает расчет, в монополярном синусоидальном и пилообразном полях при малых значениях $\beta_2 (\ll 0.01)$ границы двигаются синхронно, ширина кольцевого домена не изменяется, а кольцо быстро сжимается и схлопывается. При больших значениях параметра β (≈ 0.01) доменные границы двигаются не синхронно: с увеличением поля радиус у внутренней границы уменьшается, а у внешней не изменяется; при уменьшении поля, наоборот, радиус у внутренней не изменяется, а у внешней уменьшается. Ранее такое же поведение кольцевого домена наблюдалось в пластинах ортоферритов, помещенных в монополярное переменное магнитное поле [6, 7]. Динамика изолированного кольцевого домена рассматривалась и с учетом инерционных эффектов, однако качественного отличия обнаружено не было, что дополнительно свидетельствует в пользу выбранного приближения.

Поведение СККД в знакопеременном синусоидальном поле (без подмагничивающего) исследовалось для различного числа доменных границ в системе. Было установлено, что существенных качественных различий в поведении кольцевого домена и системы с большим числом границ нет. Использовался следующий критерий устойчивости: если на начальном этапе своего существования радиусы соседних доменных границ не равны и не обращаются в нуль, то система считается устойчивой. Было установлено, что увеличение частоты, при неизменной амплитуде поля, может повысить устойчивость СККД. На рис.2 для системы из 4 ДГ показано изменение их радиусов со временем. Амплитуда поля на обоих рисунках одинакова, но на рис.2a частота поля равна 20 кГц, а на рис.2b – 50 кГц. На рис.2a видно, что радиус внутренней границы в некоторый момент времени становится равным нулю, а это, согласно выбранному критерию, свидетельствует о неустойчивости системы при данной частоте. Лишь после того, как внешние границы удалились на некоторое расстояние, радиус внутренней границы становится отличным от нуля. На рис.2b радиусы всех границ отличны от нуля, то есть повышение частоты поля привело к повышению устойчивости этой СККД. Из сравнения рисунков 2a и b видно, что с увеличением частоты внешнего поля уменьшается амплитуда колебаний ДГ, уменьшается и внешний размер системы, а следовательно, и скорость ее “роста”. Расчет показывает, что выше некоторого значения амплитуды поля система теряет устойчивость. Однако увеличение частоты возвращает систему в устойчивое состояние. Для обнаруженной зависимости устойчивости от амплитуды и частоты поля можно предложить следующее объяснение: увеличение частоты приводит к уменьшению амплитуды колебаний границ, следовательно, расстояние между ними в среднем за период колебания поля становится больше, то есть границы не успевают “схлопнуться”. Увеличение амплитуды поля, напротив, увеличивает амплитуду колебаний ДГ, что и приводит к их “схлопыванию”, то есть к потере системой устойчивости.

На рис.3 приведены вычисленные зависимости верхней границы (по амплитуде поля) области устойчивости от частоты для систем с различным числом ДГ. Из рис.3 можно видеть, что система с $N = 2$ при частоте 20 кГц неустойчива, если приведенная амплитуда поля равна $h = 0.54$, но будет устойчива при данной амплитуде, если увеличить частоту до 25 кГц. Подобные зависимости имеют место на опыте [1, 2].

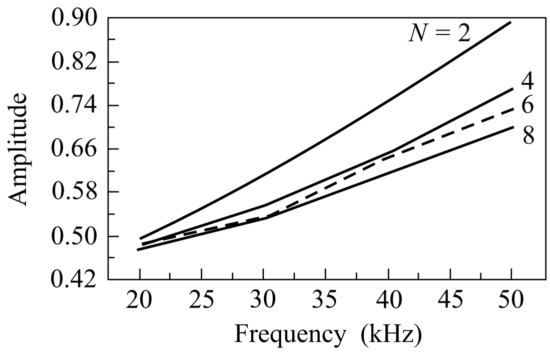

Рис.3. Верхние границы амплитудно-частотной области существования СККД из 2, 4, 6 и 8 доменных границ

Из рис.3 видно также, что при фиксированной частоте амплитуда колебаний поля, при которой система еще является устойчивой, уменьшается с увеличением числа доменных границ. Следовательно, если, не изменяя частоты поля, увеличивать его амплитуду, то число ДГ в СККД будет уменьшаться. Такое уменьшение числа ДГ в ВЦ, при увеличении амплитуды поля наблюдается и на опыте [3].

Согласно рис.3, при достижении амплитудой поля определенного значения (при фиксированной частоте) система становится неустойчивой, то есть внутренняя граница имеет радиус, отличный от нуля, лишь спустя некоторое время после включения поля, как это показано на рис.2а. Это означает, что образование новой границы произошло за большее время, чем это имело место при меньших амплитудах. Уменьшение частоты "работы" ВЦ (частоты образования новых границ) с увеличением амплитуды поля накачки также было обнаружено на опыте [2]. Результаты, приведенные на рис.2 и 3, получены для $\beta_2 = 10^{-6}$. Это значение соответствует используемым на опыте пленкам ферритов-гранатов. Расчет показывает, что увеличение параметра β_2 приводит к повышению устойчивости системы, так, например, при фиксированной частоте система будет устойчивой при больших значениях амплитуд в пленках с большим β_2.

Используя вычисленные, для различных N, зависимости верхней границы (по амплитуде поля) области устойчивости СККД от частоты можно объяснить ряд наиболее ярких особенностей в поведении ВЦ. Это позволяет говорить об эффективности выбранного подхода и сделать вывод, что амплитудно-частотная область существования ВЦ представляет собой область его динамической устойчивости. Особо следует отметить, что частота поля накачки оказывается стабилизирующим фактором для системы динамических концентрических кольцевых доменов.

Работа выполнена при поддержке US Civilian Research & Development Foundation for the Independent States of the Former Soviet Union (грант # REC-005).

---

1. Г. С. Кандаурова, А. Э. Свидерский, ЖЭТФ **97**, 1218 (1990).
2. Г. С. Кандаурова, ДАН **331**, 428 (1993).
3. Г. С. Кандаурова, ФММ **79**, 158 (1995).
4. А. Ф. Гальцев, Ю. И. Ялышев, ФММ **85**, 5 (1998).
5. В. Н. Мальцев, Н. М. Фахрутдинов, ФММ **88**, 17 (1999).
6. А. В. Антонов, А. М. Балбашов и др., ФТТ **14**, 1901 (1972).
7. F. A. de Jonge, W. F. Druyvesteyn, and A. G. H. Verhulst, J. Appl. Phys. **42**, 1270 (1971).