

УДК 536.763 : 537.624.9

## ДИНАМИЧЕСКИЕ МИКРОМАГНИТНЫЕ СТРУКТУРЫ В МАГНИТООДНООСНЫХ ПЛЕНКАХ ФЕРРИТОВ-ГРАНАТОВ

В. Г. Клепарский, И. Пинтер

С использованием метода высокоскоростной фотографии впервые обнаружены и исследованы метастабильные динамические микромагнитные структуры, формирующиеся в процессе спинодального распада состояния однородной намагниченности в магнитоодноосных пленках ферритов-гранатов.

В последнее время активно изучаются процессы динамического структурообразования в открытых нелинейных системах при достаточном удалении от равновесия [1, 2]. Особый интерес представляет режим спинодального распада в монокристаллических пленках ферритов-гранатов (МПФГ), где термодинамическая неустойчивость исходного однородного состояния намагниченности легко может быть реализована соответствующим воздействием внешних перемещающих полей. В то же время сведений о закономерностях динамического структурообразования при спинодальном распаде однородной намагниченности в МПФГ явно недостаточно, поскольку имеющиеся данные относятся лишь к локальным объемам вблизи дефектов кристаллического строения [3, 4]. Кроме того, используемое в [3, 4] описание явления основано на нахождении характерного периода структуры путем исследования термодинамического порога устойчивости относительно возмущений макроскопической однородности. При таком подходе трудно делать какие-либо оценки о времени установления динамической микромагнитной структуры.

Рассмотрим поэтому динамику структурообразования с использованием уравнения движения намагниченности Ландау—Лифшица. При компонентной форме написания этого уравнения скорость изменения полярного угла  $\theta$  в начальный момент спинодального распада однородной намагниченности при антипараллельном расположении векторов намагниченности  $M$  и перемещающего поля  $H$  может быть определена выражением

$$\dot{\theta} = -\frac{\gamma}{\alpha M} \frac{\delta f(M)}{\delta \theta}, \quad (1)$$

где  $\alpha$  — безразмерный параметр затухания,  $\gamma$  — гиромангнитная постоянная,  $f(M)$  — плотность свободной магнитной энергии.

Учитывая увеличение плотности свободной энергии  $f(M)$ , связанное с небольшими неоднородностями распределения намагниченности, для магнитоодноосной пленки с осью анизотропии, перпендикулярной ее плоскости, имеем

$$f(M) = A [(\nabla\theta)^2 + \sin^2\theta (\nabla\varphi)^2] + K_u \sin^2\theta + 2\pi M^2 \cos^2\theta - HM \cos\theta, \quad (2)$$

где  $A$  — константа обменного взаимодействия,  $K_u$  — константа магнитной анизотропии.

Тогда кинетика изменения полярного угла  $\theta$  на ранней стадии спинодального распада может быть описана выражением

$$\dot{\theta} = -\frac{\gamma}{\alpha M} \left( \frac{\partial f(M)}{\partial \theta} - 2A\nabla^2\theta \right). \quad (3)$$

Уравнение (3) допускает однородное решение, при котором  $\nabla^2\theta=0$ . В этом случае изменение полярного угла во времени описывается выражением

$$\theta = \theta_0 \exp\left[\frac{\gamma}{\alpha} (H - H_k^{\text{эфф}})(t - t_0)\right], \quad (4)$$

где

$$H_k^{\text{эфф}} = 2K_{\text{н}}/M - 4\pi M.$$

Анализируя (4), можно заметить, что асимптотическая устойчивость, по Ляпунову, для однородного решения кинетического уравнения (3) возможна лишь в перемангничивающих полях  $H < H_k^{\text{эфф}}$ . Оценку устойчивости в интересующем нас случае  $H > H_k^{\text{эфф}}$  проведем с учетом всегда возможных малых возмущений  $\theta^*(r, t) = \theta(r, t) - \theta_0$  относительно однородного решения.

Линеаризованное приведенное уравнение для возмущений будет иметь вид

$$\frac{\partial \theta^*}{\partial t} = -\frac{\gamma}{\alpha M} \left[ \left( \frac{\partial^2 f(M)}{\partial \theta^2} \right)_0 \theta^* - 2A \nabla^2 \theta^* \right]. \quad (5)$$

Решение приведенного уравнения для возмущений будем искать в виде ряда Фурье

$$\theta^* = \Sigma A(k, t) \exp(ikz), \quad (6)$$

где  $k$  — волновое число, определяющее длину волны  $\lambda = 2\pi/k$  малоугловых отклонений намагниченности,

$$A(k, t) = A(k, 0) \exp[R(k)t], \quad (7)$$

$$R(k) = -\frac{\gamma}{\alpha} \left[ (H_k^{\text{эфф}} - H) + \frac{2A}{M} k^2 \right]. \quad (8)$$

Анализируя (7) и (8), можно утверждать, что в перемангничивающих полях  $H > H_k^{\text{эфф}}$  локальные возмущения намагниченности со значениями волнового вектора  $k < k_{\text{кр}}$  будут экспоненциально расти, а возмущения с  $k > k_{\text{кр}}$  экспоненциально затухать. Критическое значение волнового числа  $k_{\text{кр}}$  может быть определено из выражения

$$k_{\text{кр}} = [M(H - H_k^{\text{эфф}})/2A]^{1/2}. \quad (9)$$

Отметим, что спектр возможных решений включает и однородный поворот намагниченности ( $k=0$ ). Нужно, однако, учитывать физические ограничения возможных решений, связанные прежде всего с необходимостью учета конечной толщины МПФГ. Поэтому физические реализуемы лишь решения с  $k \gg k_0 \sim 1/h$ , где  $h$  — толщина МПФГ.

Поскольку  $R(k)$  содержится в выражении (7) в показателе экспоненты, то через промежуток времени  $t \gg 2.3/R(k)$  действие возмущений приведет к преимущественному выделению локальных отклонений намагниченности с длиной волны  $h > \lambda_m \gg 2\pi/k_{\text{кр}}$ . Полагая  $\alpha=0.5$ ,  $\gamma=1.7 \cdot 10^7 \text{ Э}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ ,  $M=10 \text{ Гс}$ , можно подсчитать, что в случае  $\delta H = H - H_k^{\text{эфф}} = 10 \text{ Э}$ , например, структура квазипериодических локальных отклонений намагниченности будет сформирована по истечении первых 4—5 нс действия перемангничивающего поля. Возникающее микрогетерофазное состояние полностью определяется параметрами МПФГ, а не случайными возмущениями, лишь индуцирующими начало распада однородного изменения полярного угла  $\theta$ . Для описания процесса возникновения этого состояния употребим термин «самоорганизация», а образующиеся структуры можно назвать динамическими (диссипативными, по терминологии [1]) микромагнитными структурами (ДМС).

Экспериментальное исследование основных закономерностей возникновения ДМС при импульсном перемангничивании МПФГ проводилось на модернизированной магнитооптической установке высокоскоростного фо-

тографирования (ВСФ) Центрального института физических исследований Венгерской АН [3, 4]. Линейное разрешение установки было в пределах 0.3—0.4 мкм. Время однократной экспозиции составляло 0.1 нс. Нестабильность импульса засветки по отношению к началу перемагничивающего импульса  $H$  в каждом случае не превышала  $\pm 0.2$  нс. Импульсное перемагничивающее поле  $H$ , направленное перпендикулярно плоскости МПФГ, создавалось парой катушек Гельгольца диаметром 1.5 мм и имело передний фронт  $\tau_{\text{фр}}=50$  нс. Эксперименты проводились в пленках состава  $(Y, Sm, Ca)_3(Fe, Ge)_5O_{12}$ , выращенных методом жидкофазной эпитаксии на монокристаллических подложках  $Gd_3Ga_5P_{12}$  с ориентацией (111). Пленки

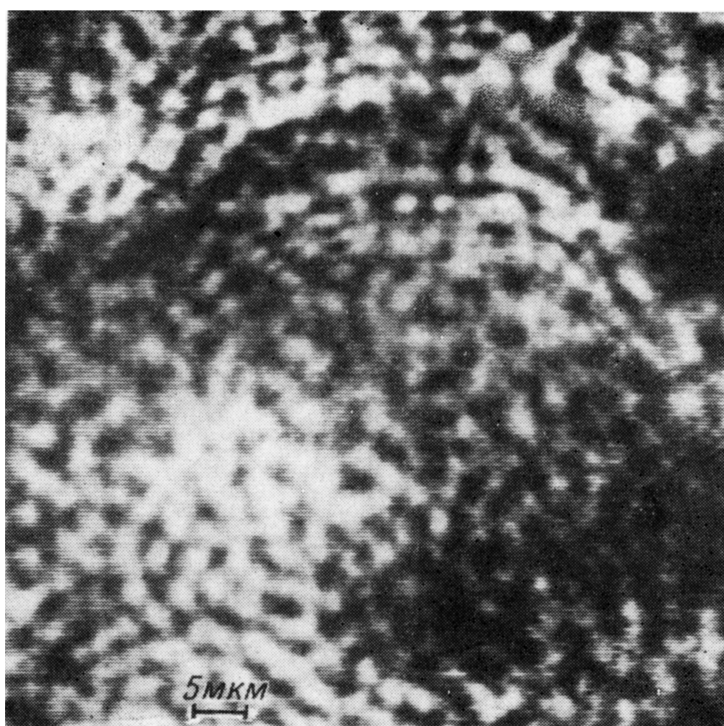


Рис. 1. Микрофотография динамической микромагнитной структуры.  $\delta H = H - H_k^{\text{эфф}} = 12.5$  Э.

были имплантированы ионами  $Ne^+$  плотностью  $2 \cdot 10^{14}$  ион/см<sup>2</sup> с энергией 80 кэВ. Толщина МПФГ составляла 7.7 мкм. При комнатной температуре намагниченности насыщения  $4\pi M=132$  Гс, константа одноосной анизотропии  $K_u=3.7 \cdot 10^8$  эрг/см<sup>3</sup>, константа обменной энергии  $A=3 \cdot 10^{-7}$  эрг/см.

ДМС визуализировались в виде квазипериодических модуляций фарадеевского контраста при скрещенном положении анализатора и поляризатора. На рис. 1 представлены типичные конфигурации ДМС, возникающие в процессе спиноподобного распада однородной намагниченности в МПФГ. Фотографирование производилось при  $t=+55$  °С, что позволило существенно снизить величину эффективного поля анизотропии  $H_k^{\text{эфф}}$ . Было замечено, что по мере роста величины  $\delta H = H - H_k^{\text{эфф}}$ , т. е. по мере углубления в область неустойчивости исходного состояния однородной намагниченности, имеет место уменьшение длины волны  $\lambda_m$  наблюдаемых модуляций. Более наглядно подобная закономерность иллюстрируется на рис. 2, где показано достаточно хорошее совпадение результатов расчета и эксперимента.

Нелинейный характер возникновения и эволюции микрогетерофазного состояния намагниченности не позволяет надеяться на достаточно простое аналитическое решение задачи о стабильности образовавшейся ДМС.

Поэтому было проведено экспериментальное исследование временной эволюции возникающих ДМС. Основные результаты этого исследования представлены на рис. 3, где приведены графики изменения периода  $\lambda_m$  наблюдаемых модулированных структур во времени. Кривая 1 построена по результатам измерения  $\lambda_m$  для  $\delta H = 12.5$  Э при  $\tau_0 = 1/R(k) = 2.75$  нс; кривая 2 — по результатам измерения для  $\delta H = 50$  Э при  $\tau_0 = 0.7$  нс. Из рис. 3 видно, что возникающие ДМС хотя и неустойчивы (к концу перематгничивания они исчезают), но достаточно долгоживущие для экспериментального обнаружения.

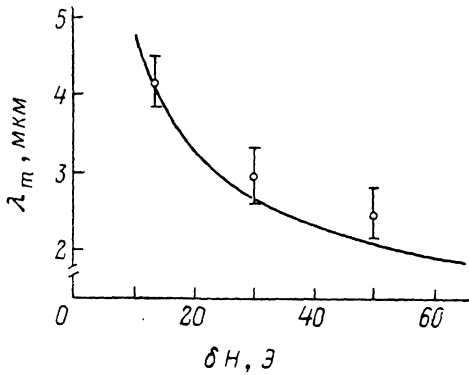


Рис. 2. Зависимость длины волны  $\lambda_m$  квазипериодической микромагнитной структуры от величины  $\delta H$  эффективного углубления в область неустойчивости однородного состояния намагниченности.

Сплошная кривая — результат расчета  $\lambda_{кр} = 2\pi/k_{кр}$  с использованием выражения (9).

Указанные структуры могут существовать достаточно долгое время (десятки и сотни нс), что делает необходимым учет их появления при проектировании устройств функциональной микроэлектроники [5].

Таким образом, результаты настоящей работы свидетельствуют о том, что при перематгничивании магнитоодноосных пленок ферритов-гранатов в полях  $H > H_k^{эфф}$  имеет место спинодальный распад состояния однородной намагниченности, в процессе которого возникают динамические микромагнитные структуры.

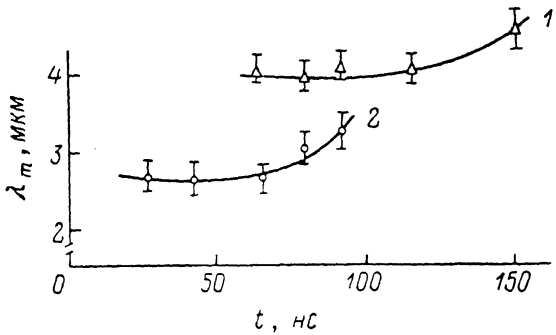


Рис. 3. Эволюция во времени периода динамических микромагнитных структур.

### Л и т е р а т у р а

[1] Николис Г., Пригожин И. Самоорганизация в неравновесных системах. М.: Мир, 1979. 512 с.  
 [2] Эбелинг В. Образование структур при необратимых процессах. М.: Мир, 1979. 279 с.  
 [3] Kleparski V. G., Pinter I. Phys. St. Sol. (a), 1983, vol. 76, N 1, p. K1—K5.  
 [4] Pinter I., Kleparski V. G. J. Magn. Mat., 1984, vol. 41, N 2, p. 312—314.  
 [5] Konishi S. IEEE Trans. on Magn., 1983, vol. MAG-19, N 5, p. 1838—1840.

Институт проблем управления  
(автоматики и телемеханики)  
Москва

Поступило в Редакцию  
2 октября 1987 г.  
В окончательной редакции  
7 апреля 1988 г.