Письма в ЖЭТФ, том 42, вып. 2, стр. 49 – 51 *25 июля 1985 г.*

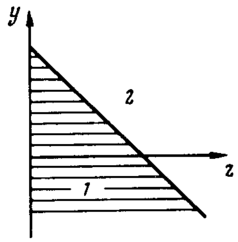
ТЕОРИЯ РЕЛАКСАЦИИ ДИНАМИЧЕСКИХ СОЛИТОНОВ В ФЕРРОМАГНЕТИКАХ

В.Г.Барьяхтар

Предложена система уравнений, описывающая релаксацию динамических солитонов. Рассчитано время релаксации медленных малоамплитудных солитонов. Показано, что при релаксации солитоны самоускоряются, а частота прецессии намагниченности в них возрастает.

1. В последнее время значительное внимание уделяется нелинейным одномерным волнам в ферромагнетиках [1]. Одними из простейших решений уравнения Ландау – Лифшица являются солитоны типа кинков (или доменные границы) и динамические солитоны. Торможение доменных границ исследовано как в рамках феноменологического описания диссипации с помощью релаксационного члена в уравнении Ландау – Лифшица, так и на основе исследования процессов рассеяния спиновых волн доменными границами [2–4]. Что же касается динамических солитонов, то их релаксация практически не исследована, хотя бездиссипативная динамика таких солитонов построена достаточно полно.

Настоящее сообщение посвящено развитию методов расчета процессов затухания динамического солитона. Для простоты будет рассмотрен достаточно медленный малоамплитудный одномерный солитон в ферромагнетике. Показано, что диссипативные процессы приводят к возрастанию скорости солитона и частоты прецессии намагниченности в солитоне. В результате этих процессов солитон "перемещается" на плоскости ω, v^2 к границе раздела между областью существования динамических солитонов (см. рис. 1) и спиновых волн и распадается на спиновые волны.



1 – область существования динамического солитона, *2* – область спиновых волн. На прямой $y + z = 1$ энергия солитона обращается в нуль

2. Будем исходить из следующего выражения для внутренней энергии ферромагнетика

$$W = \frac{1}{2} \int \{ \alpha (\partial M_i / \partial x_k)^2 + \beta (M_0^2 - M_z^2) \} \, d^3x \qquad (1)$$

и уравнения Ландау – Лифшица

$$\dot{\mathbf{M}} = \gamma [\mathbf{M}, \mathbf{H}_e] + \lambda_e a^2 \gamma M_0 \Delta \mathbf{H}_e + (\lambda / M_0) [\mathbf{M}, \mathbf{M}] \; . \qquad (2)$$

В этих формулах α и β – обменная константа магнитной анизотропии, γ – гиромагнитное отношение, λ_e и λ – обменная[5] и релятивистская[6] релаксационные константы, a – постоянная решетки и $\mathbf{H}(\mathbf{x}, t) = \delta W / \delta \mathbf{M}(\mathbf{x}, t)$ – эффективное магнитное поле. Релаксационным членам в уравнении (2) соответствует диссипативная функция

$$\dot{Q} = -\frac{1}{2} \dot{W} = (\lambda M_0 / 4\gamma) \int [\dot{\theta}^2 + \dot{\varphi}^2 \sin^2\theta] \, d^3x + (\lambda_e a^2 M_0 / 4\gamma) \cdot$$

$$\cdot \int [(\dot{\theta}_i - \varphi_i \dot{\varphi} \sin\theta \cos\theta)^2 + (\dot{\varphi}_i \sin\theta \cos\theta + \dot{\theta} \varphi_i)^2 + (\theta_i \dot{\varphi} + \dot{\varphi}_i \sin\theta \cos\theta)^2 +$$

$$+ (2\varphi_i \theta_i \dot{\varphi} \dot{\theta} - \dot{\varphi}_i^2 \sin^2\theta) \cos 2\theta] \, d^3x = \dot{Q}_r + \dot{Q}_e \, , \qquad (3)$$

где θ и φ – полярный и азимутальный углы вектора M.

Динамический солитон характеризуется частотой прецессии намагниченности ω и скоростью движения центра тяжести v. Вместо этих величин как показано в [1], солитон можно описывать с помощью числа N спиновых отклонений в нем и энергии W. Число спиновых отклонений N определяется формулой [1]

$$\frac{\omega_0 N}{E_0} = \int (1 - \cos\theta) \, d^3x = \frac{\mathcal{M}_0 - \mathcal{M}_z}{\mathcal{M}_0} \; , \qquad (4)$$

где $\omega_0 = \gamma\beta M_0$, E_0 – поверхностная энергия блоховской доменной границы $E_0 = 2\sqrt{\alpha\beta}\, M_0^2$, $\mathcal{M}_0 = M_0 V$ и $\dot{\mathcal{M}}_z$ – составляющая компонента полного момента тела на ось z, V – объем тела. Величины N и W для динамического солитона равны [1]

$$N = (E_0 / \omega_0) \operatorname{arsh} (E / E_0 \Omega),$$

$$W = 2E_0 \sqrt{1 - z - y}, \qquad (5)$$

где $y = \omega / \omega_0$, $z = v^2 / v_m^2$, $v_m = 2\omega_0 \sqrt{\alpha / \beta} = 2\omega_0 x_0$, $\Omega^2 = 4z + y^2$.

В отсутствии диссипации E и N – интегралы движения. Диссипация приводит к медленному изменению со временем величин E и N. Процесс релаксации описывается формулами

$$\frac{1}{2} \frac{d}{dt} W^2 = -2\dot{Q} W \, ; \quad \dot{N} = \dot{N}_{\text{ст}} \, , \qquad (6)$$

где $N_{\text{ст}}$ – изменение N за счет релаксации. Диссипативную функцию $\dot{Q}$ мы уже определили. Чтобы найти $\dot{N}_{\text{ст}}$ заметим, что с точностью до множителя N пропорционально относительному отклонению $\mathcal{M}_z$ от равновесного значения. Поэтому обменная релаксация не дает вклада в $\dot{N}_{\text{ст}}$, и эта величина определяется только релятивистской релаксационной постоянной λ.

Используя (4) и (2) находим

$$\dot{N}_{\text{ст}} = -\lambda\,(E_0 / \omega_0)\int \dot{\varphi}\,\sin^2\theta\, d^3x\,. \tag{7}$$

Формулы (5) – (7) и (3) представляют собой полную систему уравнений для описания диссипации энергии в солитоне, т.е. изменения со временем ω и v .

3. Рассмотрим малоамплитудный солитон, для которого $W \ll E_0$. Распределение намагниченности в нем задается формулами [1]

$$\sin\theta \approx \theta = (A / \operatorname{ch}\eta)\,; \quad \varphi = (y + 2z)\,\omega_0 t \; - z^{1/2}\,(x / x_0)\,, \tag{8}$$

где $A = (W / E_0)(1 + z)^{-1/2}$, $\eta = (W / 2x_0E_0)(x - vt)$.

Для простоты будем считать, что солитон не только малоамплитудный, но и достаточно медленный $v \ll v_m$. В этом случае как нетрудно убедиться $Q_e \ll Q_r$ и как процесс релаксации W, так и процесс релаксации N описывается одним параметром λ. Используя распределение (8) и формулы (3) и (7) нетрудно вычислить $\dot{N}_{\text{ст}}$ и $\dot{Q}$ как функции y, z. С помощью формул (5) легко выразить $W\dot{W}$ и $\dot{N}$ через $\dot{y}$ и $\dot{z}$. Наконец, подставляя полученные выражения в (6) получим систему двух дифференциальных уравнений типа

$$\dot{y} = f_1\,(y, z)\,; \quad \dot{z} = f_2\,(y, z) \tag{9}$$

решение которой и дает $y = y(t)$, $z = z\,(t)$.

В случае медленного малоамплитудного солитона $\Omega \approx 1$ и уравнения (9) сводятся к одному уравнению

$$\dot{W} = -\,2\lambda\,\omega_0\,W\,. \tag{10}$$

Откуда

$$W = W_0 e^{-2\lambda\omega_0 t}\,, \tag{11}$$

где W_0 – начальная энергия солитона, величина $\tau = (1/2\lambda\omega_0)$ имеет смысл времени релаксации солитона. Так как энергия солитона убывает с ростом y и z (или что то же самое с ростом ω и v^2), то при диссипации энергии солитона возрастает его скорость v и частота прецессии ω .

Автор благодарит Б.А.Иванова за ценные дискуссии.

Литература

1. *Косевич А.М., Иванов Б.А., Ковалев А.С.* Нелинейные волны намагниченности. Динамические и топологические солитоны. Киев, Наукова думка, 1983 г.
2. *Малоземов А., Слонзуски Дж.* Доменные стенки в материалах с цилиндрическими магнитными доменами. М.: Мир, 1982 г.
3. *Абызов А.С., Иванов Б.А.* ЖЭТФ, 1979, 76, 1700.
4. *Иванов Б.А., Мицай Ю.Н., Шахова Н.В.* ЖЭТФ, 1984, 87, 289.
5. *Барьяхтар В.Г.* ЖЭТФ, 1984, 87, 1501.
6. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* SOW Phys., 1935, 8, 153; *Ландау Л.Д.* Собрание трудов. М.: Наука, 1969, с. 127.

Институт металлофизики
Академии наук Украинской ССР

Поступила в редакцию
18 мая 1985 г.