

Акустический магнитный резонанс в поглощении и дисперсии поверхностных упругих волн в многослойных пленках

В. И. Окулов¹, Е. А. Памятных², В. В. Словицкая², В. В. Устинов¹

¹ *Институт физики металлов УрО РАН, 620219, г. Екатеринбург, ГСП-170, ул. С. Ковалевской, 18*

² *Уральский государственный университет, 620083, г. Екатеринбург, пр. Ленина, 51*
E-mail: elph@ifm.e-burg.su

Статья поступила в редакцию 14 сентября 1998 г.

Показано, что в спектре и поглощении акустических поверхностных волн Лява, распространяющихся в многослойной пленке с магнитным упорядочением типа Fe/Cr на массивной подложке, могут проявляться магнитные резонансы, обусловленные возбуждением колебаний намагниченностей слоев. Проведен расчет резонансного магнитоупругого вклада в сдвиговый модуль упругости пленки и установлена связь резонансных частот с частотами однородного ферромагнитного резонанса при электромагнитном возбуждении.

Показано, що у спектрі та поглинанні акустичних поверхневих хвиль Лява, які поширюються у багат шаровій плівці з магнітним упорядкуванням типу Fe/Cr на масивній підкладці, можуть виявлятися магнітні резонанси, які обумовлені збудженням коливань намагніченостей шарів. Проведено розрахунок резонансного магнітопружного вкладу в зсувний модуль пружності плівці та встановлено зв'язок резонансних частот з частотами однорідного ферромагнітного резонансу при електромагнітному збудженні.

PACS: 75.70.-i, 76.50.-y

В исследованиях характера магнитного упорядочения и гигантского магнитосопротивления в многослойных пленках типа Fe/Cr до сих пор использовался определенный набор экспериментальных методов, с помощью которых получен большой объем данных, относящихся к магнитной и атомной структуре таких пленок [1,2]. Однако полученная информация, хотя и позволившая принципиально объяснить основные черты наблюдаемых закономерностей, оказывается недостаточной для однозначного и последовательного описания на атомном уровне физической природы как самого магнитного упорядочения, так и механизмов гигантского магнитосопротивления.

Один из путей решения связанных с этим проблем состоит в расширении круга явлений, исследование которых в магнитных многослойных пленках позволит определить качественно новые микропараметры таких пленок. Нами показано [3], что перспективным в этом отношении является использование акустических методов, в

частности, исследование частот и затухания поверхностных упругих волн в системе пленка—массивная кристаллическая подложка. В частотах поверхностных волн проявляется зависимость упругих модулей пленки от намагниченности и напряженности магнитного поля, которая дает информацию о природе упорядочения, а в затухании проявляются механизмы гигантского магнитосопротивления.

Наряду с рассмотренными в [3] нерезонансными полевыми зависимостями в параметрах поверхностных упругих волн может проявляться также магнитный резонанс. Такой резонанс наблюдался, например, в волнах Рэлея, распространяющихся в системе, состоящей из пленки никеля толщиной 200 Å на пьезоэлектрической подложке [4]. В настоящем сообщении мы приводим результаты теории, описывающей проявления магнитного резонанса в поглощении и дисперсии поверхностных упругих волн на примере волн

Лява, распространяющихся в системе многослойная пленка – подложка.

Рассмотрим реальную ситуацию, когда длина поверхностной волны велика по сравнению с толщиной пленки. Тогда выражение для фазовой скорости волны Лява s записывается следующим образом:

$$s = v_0 - \frac{1}{2} k^2 L_f^2 \left(\frac{\rho_f}{\rho_0} - \frac{\lambda_f}{\lambda_0} \right)^2 v_0, \quad (1)$$

где k – волновой вектор; v_0 , ρ_0 , λ_0 – скорость звука, плотность и модуль упругости подложки; L_f , ρ_f , λ_f – толщина, плотность и модуль упругости пленки. Магнитный резонанс может проявляться в том вкладе, который возникает в модуле упругости магнитной пленки λ_f из-за взаимодействия упругих колебаний с колебаниями намагниченности.

Для расчета этого вклада рассмотрим ультразвуковые колебания в отдельном магнитном слое, занимающем область $0 < z < L$. Будем считать, что вектор упругого смещения и равновесная намагниченность параллельны оси x . Тогда, разлагая амплитуду смещения $u(z)$ и неравновесную часть намагниченности $m(z)$ в ряды Фурье

$$u(z) = \frac{2}{L} \sum_{N=0}^{\infty} \left(1 - \frac{1}{2} \delta_{N0} \right) u_N \cos q_N z, \\ m(z) = \frac{2}{L} \sum_{N=0}^{\infty} m_N \sin q_N z, \quad q_N = \frac{\pi N}{L}$$

и предполагая изотропию в плоскости границ, получаем следующее уравнение для u_N :

$$-\omega^2 \rho_f u_N = -q_N^2 \lambda u_N + h_{me} q_N m_{zN} + \\ + (-1)^N F(L) - F(0), \quad (2)$$

где ω – частота; λ – упругий модуль кристаллической решетки; h_{me} – параметр магнитоупругого взаимодействия; $F(L)$, $F(0)$ – величины упругих напряжений на границах $z = L$, $z = 0$.

Решая уравнение (2), находим амплитуды смещений на границах $u(0)$ и $u(L)$, а затем из соотношения

$$u(L) - u(0) = \frac{L}{\lambda_f} \frac{1}{2} [F(L) + F(0)], \quad (3)$$

справедливого для тонкого слоя, толщина которого мала по сравнению с длиной волны, получаем модуль упругости λ_f в виде $\lambda_f = \lambda + \lambda_{me}$, где

λ_{me} – вклад магнитоупругого взаимодействия. Считая многослойную пленку состоящей из одинаковых фрагментов, можно применить соотношение (3) и к ней, заменив толщину отдельного фрагмента L на толщину всей пленки L_f . Специфика многослойной системы при этом проявляется в характере магнитного упорядочения.

В случае, когда повторяющийся фрагмент состоит из двух слоев с модулями упругости λ_1 и λ_2 , величина λ_f определяется по формуле $\lambda_f^{-1} = \lambda_1^{-1} + \lambda_2^{-1}$. Для пленки Fe/Cr один из вкладов относится к слоям железа, причем различие направлений равновесных намагниченностей слоев проявляется в том, что этот вклад зависит от относительной ориентации намагниченностей соседних слоев.

Величина m_{zN} выражается через амплитуду смещения u_N из уравнения для намагниченности с соответствующими граничными условиями. Общее выражение выглядит следующим образом:

$$m_{zN} = h_{me} q_N^2 \sum_{N'} \alpha_{NN'} u_{N'}. \quad (4)$$

Зависимость коэффициента $\alpha_{NN'}$ от волновых векторов q_N и $q_{N'}$ обусловлена неоднородным обменным взаимодействием, а интегральный характер соотношения (4) отражает возникновение намагниченности на границах пленки при упругих колебаниях. Если вкладом граничных значений можно пренебречь (жесткое закрепление спинов в приграничных слоях), то формула (4) принимает вид

$$m_{zN} = h_{me} q_N^2 \chi_N^{zz} u_N, \quad (5)$$

где χ_N^{zz} – компонента магнитной восприимчивости по отношению к переменному магнитному полю на границе $z = 0$. В этом приближении можно получить следующую простую формулу для λ_{me} :

$$\lambda_{me} = h_{me}^2 \frac{4}{L^2} \sum_{N=1}^{\infty} \frac{1}{q_N} [(-1)^N - 1] \chi_N^{zz}. \quad (6)$$

Формулой (6) описывается резонансная зависимость скорости поверхностной волны от частоты и напряженности магнитного поля. Если магнитные колебания слоя сводятся к колебаниям средней намагниченности (например, при параллельной ориентации намагниченностей всех слоев), то соответствующая формула для χ_N^{zz} , полученная из известных уравнений для намагниченности [5], имеет вид

$$\chi_N^{zz} = -\frac{1}{q_N} \times \frac{\Omega_0(\Omega_f + \eta q_N^2)}{(\omega + i\Gamma)^2 - (\Omega_f + \eta q_N^2)(\Omega_f + \eta q_N^2 + 4\pi\Omega_0)}, \quad (7)$$

где $\Omega_0 = \gamma M_0$, γ — магнитомеханическое отношение, M_0 — равновесная намагниченность; Ω_f — частота однородного резонанса в отсутствие размагничивающего поля; η — параметр обменного взаимодействия; Γ — параметр затухания. Формула (6) при подстановке (7) описывает акустический магнитный резонанс, уширенный обменным взаимодействием, а при определенных условиях и спин-волновые резонансы. Если обменное взаимодействие несущественно ($\eta \ll \Omega_f L^2$), то

$$\lambda_{me} = h_{me}^2 \frac{\Omega_0 \Omega_f}{(\omega + i\Gamma)^2 - \Omega_f(\Omega_f + 4\pi\Omega_0)} \quad (8)$$

и в упругих модулях проявляется однородный магнитный резонанс.

Для многослойных пленок типа Fe/Cr восприимчивость χ_N^{zz} следует относить к повторяющемуся фрагменту, включающему соседние ферромагнитные слои, имеющие в общем случае различные направления намагниченности (антипараллельное или неколлинеарное упорядочение). Резонансные частоты в таких системах рассчитывались в работе [6]. Используя результаты этих расчетов, можно получить в выбранной нами геометрии при однородном резонансе выражение вида (8) с заменой резонансной частоты $\sqrt{\Omega_f(\Omega_f + 4\pi\Omega_0)}$ на другую, учитывающую различие ориентаций соседних слоев.

Влияние обменного взаимодействия на акустический магнитный резонанс иллюстрируется рис. 1, на котором показана зависимость от частоты величины λ_{me} в условиях, когда обменное взаимодействие искажает линию однородного резонанса и приводит к появлению новой резонансной особенности.

Согласно изложенному выше, в параметрах поверхностных упругих волн могут проявляться резонансы, связанные с возбуждением собственных магнитных колебаний в многослойных пленках. Положение и форма линий таких резонансов, их зависимость от напряженности магнитного поля определяются характером магнитного упорядочения и другими фундаментальными свойствами

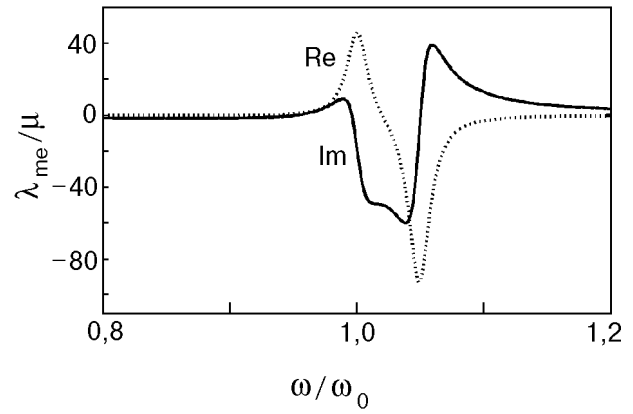


Рис. 1. Акустический магнитный резонанс в зависимости от частоты модуля упругости пленки при сильном влиянии обменного взаимодействия на форму линии; $\mu = h_{me}^2 m^2 \Omega_0 / \omega_0^2$, m — намагниченность пленки, отнесенная к намагниченности насыщения.

пленок, которые, таким образом, могут быть исследованы с помощью наблюдения поверхностных акустических волн.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 95-02-17517) и ИНТАС (грант № 05-31).

1. R. E. Camley and R. L. Stamps, *J. Phys.: Condens. Matter.* **5**, 3727 (1993).
2. P. M. Levy, *Solid State Phys.* **47**, 367 (1994).
3. И. С. Машарова, В. И. Окулов, Е. А. Памятных, В. В. Словиковская, В. В. Устинов, *Письма в ЖТФ* **22**, 53 (1996).
4. M. Levy and H. Yoshida, *JMMM* **35**, 139 (1983).
5. А. Г. Гуревич, Г. А. Мелков, *Магнитные колебания и волны*, Наука, Москва (1994).
6. N. G. Bebenin, A. V. Kobelev, A. P. Tankeyev, and V. V. Ustinov, *JMMM* **165**, 468 (1997).

Acoustic magnetic resonance in the surface elastic waves absorption and dispersion by multilayers

V. I. Okulov, E. A. Pamyatnykh,
V. V. Slovikovskaya, and V. V. Ustinov

It is shown that magnetic resonances related to the excitation of oscillations of the layer magnetizations can be revealed in the spectrum and absorption of the Love surface elastic waves propagating in a magneto-ordered film on a massive substrate. The magnetoelastic resonance contribution to the elastic modulus of the film is calculated and connection between the resonance frequencies and the frequencies of electromagnetically excited uniform ferromagnetic resonance is established.