

кристаллов, их размеров (чем больше кристалл, тем меньше скорость), может сильно различаться в различных соединениях (кристаллы Pb_2ScNbO_6 при 900 °С упорядочиваются десятки часов) и состояниях (в кристаллах она, как правило, больше, чем в керамике).

Как видно из таблицы, величина α в различных соединениях тем больше, чем больше разность радиусов упорядочивающихся ионов $\Delta R = |R_{B'} - R_{B''}|$ (использовалась система радиусов Шеннона). Такая корреляция согласуется с теоретическими выводами [5]. Новые материалы для датчиков температуры следует, поэтому, искать среди соединений с большим ΔR .

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Николаенко В.А., Карпухин В.И. Измерение температуры с помощью облученных материалов. М.: Энергоатомиздат, 1986. 120 с.
- [2] Б о к о в А.А., Р а у е в с к у ю I.P. // Ferroelectrics. 1989. V. 90. P. 125-133.
- [3] Барфут Дж., Тейлор Дж. Полярные диэлектрики и их применение. М.: Мир, 1981. 526 с.
- [4] Б о к о в А.А., Р а е в с к и й И.П., С м о т р а к о в В.Г. // ФТТ. 1983. Т. 25. № 7. С. 2025-2027.
- [5] Б о к о в А.А., Х а с а б о в А.Г., Р а е в с к и й И.П. // Изв. АН СССР. Сер. физическая. 1990. Т. 54. № 4. С. 732-736.

Научно-исследовательский
институт физики,
Ростовский государственный
университет

Поступило в Редакцию
12 июня 1990 г.

Письма в ЖТФ, том 16, вып. 17

12 сентября 1990 г.

05.2; 08

© 1990

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
МАГНИТОСТАТИЧЕСКИХ И УПРУГИХ ВОЛН
В ФЕРРИТОВЫХ ПЛЕНКАХ

А.С. Б у г а е в, В.Б. Г о р с к и й,
А.В. П о м я л о в

В дисперсионные уравнения магнитоупругих волн [1] в ферритовых пленках входит параметр магнитоупругого взаимодействия η ,

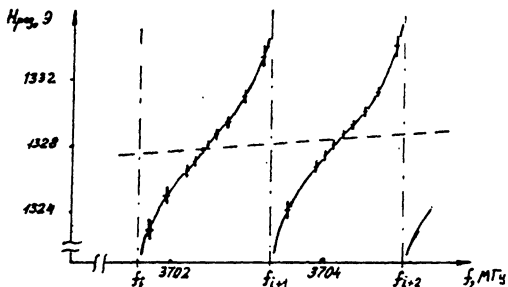


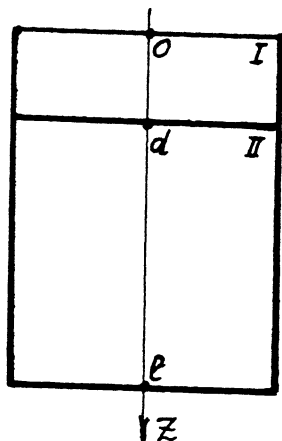
Рис. 1. Экспериментальная зависимость $H_{рез}(f)$ для СВР моды с волновым числом k , равным волновому числу k_α упругого колебания. $k \approx k_\alpha \approx 6.4 \cdot 10^4 \text{ см}^{-1}$. Толщина пленки $d \approx 10 \text{ мкм}$. Толщина всей структуры пленка-подложка $l \approx 450 \text{ мкм}$. Пунктирная линия - зависимость $H_{рез}(f)$ в отсутствие магнитоупругого взаимодействия. f_i - частоты отсечки мод Лэмба.

равны $4b_{44}^2 M^2 / c_{44}$, где M - намагниченность насыщения, b_{44} и c_{44} - соответственно матричные элементы тензоров магнитоупругих постоянных и упругих модулей в системе координат с осью Z , направленной по нормали к поверхности ферритовой пленки (ФП). В настоящей работе показана возможность определения параметра γ в упруго изотропных кристаллах с кубической симметрией на основе эффектов магнитоупругого взаимодействия в спектре спин-волновых резонансов (СВР).

1. В работе [2] было показано, что при совпадении волновых чисел СВР мод и упругих волн (УВ), СВР моды за счет магнито-стрикции возбуждают в планарной структуре ФП-подложка упругие колебания. Дискретность спектра упругих возбуждений в такой структуре приводит к периодической частотной зависимости эффективности возбуждения упругих колебаний модами СВР с максимумами на частотах отсечки мод Лэмба f_i . При этом, в частности, наблюдается аномальная зависимость резонансных магнитных полей мод СВР $H_{рез}$ от частоты f . Пример подобной зависимости показан на рис. 1 для СВР моды, волновое число k которой в направлении нормали совпадает с волновым числом УВ k_α . Следует отметить, что осциллирующая зависимость $H_{рез}(f)$ наблюдается для нескольких СВР мод. Однако наиболее сильное отклонение зависимости $H_{рез}(f)$ от линейной наблюдается для мод СВР с $k = k_\alpha$, и аномалии в зависимости $H_{рез}(f)$ тем меньше, чем сильнее различаются k и k_α . Рассмотрим подробнее данный эффект.

2. Определим влияние возбуждения упругих колебаний СВР модами на зависимость $H_{рез}(f)$. При решении будем использовать циркулярные компоненты переменной намагниченности m и упругого смещения u . Распределение переменной намагниченности $m(z)$ СВР моды по толщине пленки ЖИГ рассматриваемой структуры (рис. 2) представим в виде

Рис. 2. Геометрия исследуемой структуры. I - ферритовая пленка; II - подложка.



$$m(z) = A \cdot \cos(k \cdot z + \varphi), \quad (1)$$

где величины k и φ определяются обменными граничными условиями на поверхностях ФП. Вследствие магнито-стрикции мода СВР возбуждает в структуре ФП-подложка упругое колебание. Распределение упругого смещения $u(z)$ по толщине структуры представим в виде ряда Фурье:

$$u(z) = \sum_i U_i \cdot y_i(z), \quad (2)$$

где $y_i(z)$ - собственные функции упругих колебаний структуры ФП-подложка. $y_i(z)$ в общем случае можно представить в виде

$$y(z) = \begin{cases} \cos(k_i z + \psi_i), & 0 < z < d \\ \alpha_i \cdot \cos(k_i^0 z + \psi_i^0), & d < z < l, \end{cases} \quad (3)$$

причем $k_i^0/k_i = V/V^0$, где V и V^0 - скорости упругих волн в пленке и подложке соответственно, а $\alpha_i, k_i, k_i^0, \psi_i, \psi_i^0$ - коэффициенты, определяемые граничными условиями для УВ на поверхностях: $z = 0, z = d, z = l$. Предполагаем, что все переменные величины зависят от времени t как $\exp(i2\pi ft)$. Подставив (1), (2) и (3) в уравнения движения упругой среды и вектора намагниченности в присутствии магнито-стрикции [3], получим следующую зависимость $H_{рез}(f)$ для мод СВР, для которых выполнено условие $kd \gg 1$:

$$\gamma H_{рез} = f - f_m \cdot \alpha \cdot k^2 - \gamma \frac{f_m}{8\pi} \sum_i \frac{\xi_i^2}{1 + \alpha_i} \frac{\rho^0(l-d)}{\rho d} \cdot \frac{f_i^*(f - f_i)}{(f - f_i)^2 + f_a^2}, \quad (4)$$

где $f_m = \gamma \cdot 4\pi M$, α - константа неоднородного обменного взаимодействия $f_i = V \cdot k_i / 2\pi$ - собственные частоты упругих колебаний в структуре ФП - подложка; f_a - мнимая часть резонансной частоты, определяющая затухание в упругой системе; ρ, ρ^0 - плотности материалов ФП и подложки соответственно,

$$\xi_i = \frac{\sin \frac{k - k_i}{2} d}{\frac{k - k_i}{2} d} \cdot \sin \left\{ \frac{k - k_i}{2} \cdot d + \psi_i + \varphi \right\}. \quad (5)$$

Для большинства используемых структур величина $f_a/\Delta f \ll 1$, где $\Delta f = f_{i+1} - f_i$. В частности, для пленки ЖИГ на подложке из ГГ $f_a/\Delta f = 10^{-2}$. Предполагая малость величины $f_a/\Delta f$, для производной $\delta \gamma H_{рез}/\delta f$ получим следующее выражение:

$$\left. \frac{\delta \gamma H_{рез}}{\delta f} \right|_{f = \frac{f_i + f_{i+1}}{2}} = 1 + 0.35 \cdot \eta \frac{f_m \cdot f}{\Delta f^2} \cdot \frac{\xi^2}{1 + \mathcal{X} \cdot \frac{\rho^0 (z-d)}{\rho d}}, \quad (6)$$

где величина ξ есть ξ_i при $k_i = k_a$, и при $\varphi_i = 0$; $k_a = 2\pi f/V$. Как видно из рис. 1 и из выражения (4), зависимость $H_{рез}(f)$ вблизи частот $(f_{i+1} + f_i)/2$ носит линейный характер. По тангенсу угла наклона зависимости $H_{рез}(f)$ вблизи указанных частот с помощью выражения (6) можно определить η . Если известны величины V , V^0 , z , d , ρ , ρ^0 , то величина \mathcal{X} в (6) может быть подсчитана точно, однако, если $\Delta V \ll V$, где $\Delta V = V - V^0$; то \mathcal{X} с точностью до $\Delta V/V$ может быть принята равной единице (для ЖИГ на ГГ, в частности $\Delta V/V = 0.08$). Для измерения η следует выбирать диапазон частот δf , в котором $k = k_a$. Действительно, величина ξ , как видно из (5), в зависимости от частоты возбуждения может изменяться от 0 до ξ_{max} и принимает максимальное значение ξ_{max} при k с точностью до π/d , равном k_a . Сама величина ξ_{max} в зависимости от φ изменяется от 0.83 до 1: $\xi_{max} = 0.83$ при полностью свободных спинах на поверхности ФП $z = 0$ ($\varphi = 0$) и $\xi_{max} = 1$ при полном закреплении спинов на указанной поверхности ($\varphi = \pi/2$).

3. Величина η может быть определена с помощью стандартной схемы измерения спектров ФМР. Для измерения необходимо выполнить несколько дополнительных условий. 1) Частоту возбуждения ориентировочно выбирают такой, чтобы соответствующая ей длина УВ в ФП была много меньше толщины ФП. 2) В спектре СВР находят моды СВР, для которых наблюдаются аномалии $H_{рез}$, как на рис. 1. 3) Для измерений выбирают одну из этих мод и для нее находят диапазон частот δf , в котором аномалии $H_{рез}$ наблюдаются с наибольшей силой. 4) Для выбранной моды необходимо провести измерение $\delta \gamma H_{рез}/\delta f$ на одной из частот $(f_{i+1} + f_i)/2$. По формуле (6) определяют η , используя при этом в качестве величины ξ^2 среднее значение величины ξ_{max}^2 , равное 0.85. Следует отметить, что в техническом отношении описанная процедура относительно проста. Диапазон δf соответствует тем частотам, на которых величина k_a с точностью до π/d равна k , при этом $\delta f = V/2\pi d$ (в нашем эксперименте величина δf составляла 50 МГц).

Полученное по разработанной методике значение параметра η для пленки ЖИГ с плоскостью (111) равно $1.8 \cdot 10^{-3}$, что близко к значению $\eta = 1.6 \cdot 10^{-3}$ для объемного кристалла ЖИГ в указанном направлении [111]. Отсутствие информации о степени закреплении спинов на поверхности ФП дает дополнительную погреш-

ность в определении величины η_{max}^2 . В качестве величины ξ_{max}^2 используется ее среднее значение, тогда как ξ_{max}^2 может меняться в зависимости от φ от 0.7 до 1. Такое предположение дает погрешность 15%. Суммарная погрешность измерения γ для пленки ЖИГ на ПТ составляла 25%.

4. Таким образом, дискретность спектров упругих и спин-волновых возбуждений в планарной структуре ферритовая пленка – подложка приводит к аномальной зависимости резонансных полей мод СВР от частоты возбуждения. В результате параметр определен по спектральным характеристикам СВР на частотах магнитоупругого синхронизма. В сочетании с методом „магнитной ямы“ [4] выше-разработанная методика позволяет определять параметр магнитоупругого взаимодействия с высокой степенью локальности в плоскости пленки (до 200 мкм).

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Б у г а е в А.С., Г у л я е в Ю.В., З и л ь б е р м а н П.Е., Ф и л и м о н о в Ю.А. // ФТТ. 1981. Т. 23. N 9. С. 2647–2652.
- [2] Г о р с к и й В.Б., П о м я л о в А.В. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. № 7. С. 61–64.
- [3] Л е - К р о у Р., К о м с т о к Р. // Магнитоупругое взаимодействие в ферромагнитных диэлектриках. В кн.: Физическая акустика / Под ред. У. Мезона. Т. 3. Ч. Б. М.: Мир, 1968. 156 с.
- [4] К а л и н и к о с Б.А., К о в ш и к о в Н.Г., Н а д е е в М.М. Всес. конф. по физике магнитных явлений. Тез. докл., Тула. 1983. 206 с.

Московский физико-технический институт

Поступило в Редакцию
12 апреля 1990 г.

Письма в ЖТФ, том 16, вып. 17

12 сентября 1990 г.

01; 02; 05.1; 05.4

© 1990

РАСЧЕТ ЦЕПОЧЕК ИОН-ИОННЫХ СТОЛКНОВЕНИЙ
В La_2CuO_4
МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ

Н.В. М о и с е е в

Перспектива использования открытых в 1986 году высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) вызывает большой интерес к