

用铁磁共振方法同时测定单晶 外延膜的 K_u 和 K_1

李靖元 郑德娟

(中国科学院物理研究所)

1979年12月12日收到

提 要

本文导出了兼具沿晶面法向感生单轴各向异性 (K_u) 和立方磁晶各向异性 (K_1) 的任一晶面沿任一方向的薄膜共振场公式, 从而提出了同时测定 K_u 和 K_1 的一种方法. 以(111)晶面为例, 给出了具体方法和实验结果.

一、引 言

用于磁泡、磁光研究的石榴石单晶外延膜中, 除了具有沿晶面法向感生的单轴各向异性 (K_u) 外, 还具有立方磁晶各向异性 (K_1), 由于这两种各向异性来源于不同的机理, 能量表达式不同, 因此测量的方法也不同. 对(111)晶面磁泡外延膜, 通常是忽略 K_1 而只测定 K_u . 而实际上在磁泡材料中 K_1 的影响已越来越引起人们的注意, 例如在经离子注入的膜面内^[4], 在不同方向加磁场时, 由于 K_1 的存在, 使破灭场和成泡场在不同的方向上发生周期变化, 减小了存贮器的偏场操作区, 并且引起在不同方向上传输性能不同^[5]. 特别当 [111] 晶轴偏离膜面法向时, 这种现象更为严重, 可以导致存贮器的失效. 因此准确地测量出 K_1 和各种非单轴各向异性就成为十分重要的问题. Enoch^[6] 是采用磁光的方法. 这只能局限于透明样品. Hubert^[7,8] 等人是用平面场成核方法, 它十分麻烦, 难以作为例行的测量方法. 本文提出用铁磁共振方法同时测定 K_u 和 K_1 以及各种非单轴的各向异性. 这种方法的优点是适应范围宽, 不受样品衬底的干扰, 重复性好, 可以在通用的铁磁共振设备上完成测量, 无需建立专用的测试设备.

本文从铁磁共振的一般表达式出发, 导出了兼具沿晶面法向感生单轴各向异性和立方磁晶各向异性的任一晶面沿任一方向的一级小角近似共振场公式, 从而确定了一种测量方法. 并以(111)晶面为例, 给出了具体方法和各种不同情况的测量结果.

二、共振场的计算

由文献[9]得到满足一级小角近似共振场为

$$H_{\text{res}} = \frac{\omega}{\gamma} - \frac{1}{2M} \left(\frac{\partial^2 E}{\partial \theta^2} + \frac{1}{\sin^2 \theta} \frac{\partial^2 E}{\partial \varphi^2} + \cot \theta \frac{\partial E}{\partial \theta} \right), \quad (1)$$

坐标系的选择如图 1 所示, 晶面法线方向的极坐标 (θ_0, φ_0) 和立方晶轴坐标系的关系如图 2 所示.

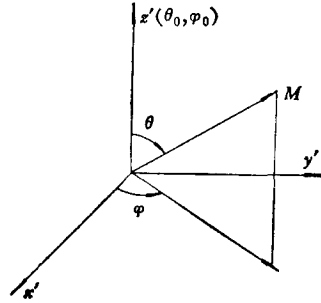


图 1 M 相对于样品的极坐标 (z' 为晶面法线方向)

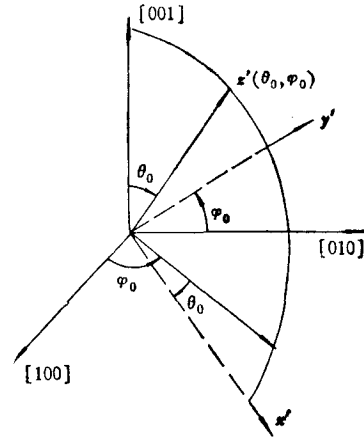


图 2 (x', y', z') 和立方晶轴坐标系关系

在小角近似下, M 与 H 方向相同, 由 (θ, φ) 表示. 系统的总各向异性能为晶体生长感生各向异性 (这里暂且采用 $K_u \sin^2 \theta$ 的形式), 薄膜形状各向异性和立方磁晶各向异性之和.

$$E = K_u \sin^2 \theta - 2\pi M_s^2 \sin^2 \theta + E_k, \quad (2)$$

$$E_k = K_1(\alpha_1^2 \alpha_2^2 + \alpha_2^2 \alpha_3^2 + \alpha_3^2 \alpha_1^2), \quad (3)$$

$$\begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_0 \cos \phi_0 & -\sin \phi_0 & \sin \theta_0 \cos \phi_0 \\ \cos \theta_0 \sin \phi_0 & \cos \phi_0 & \sin \theta_0 \sin \phi_0 \\ -\sin \theta_0 & 0 & \cos \theta_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sin \theta \cos \phi \\ \sin \theta \sin \phi \\ \cos \theta \end{pmatrix},$$

$$\begin{aligned} E_k = & K_1(\sin^4 \theta \cos^4 \phi f_1 + \sin^4 \theta \sin^4 \phi f_2 + \sin^4 \theta \sin^2 \phi \cos^2 \phi f_3 \\ & + \sin^4 \theta \sin \phi \cos^3 \phi f_4 + \sin^4 \theta \sin^3 \phi \cos \phi f_5 + \cos^4 \theta f_6 \\ & + \sin^2 \theta \cos^2 \theta \cos^2 \phi f_7 + \sin^2 \theta \cos^2 \theta \sin^2 \phi f_8 \\ & + \sin^2 \theta \cos^2 \theta \sin \phi \cos \phi f_9 + \sin^3 \theta \cos \theta \cos^3 \phi f_{10} \\ & + \sin^3 \theta \cos \theta \sin^2 \phi \cos \phi f_{11} + \sin^3 \theta \cos \theta \sin^3 \phi f_{12} \\ & + \sin^3 \theta \cos \theta \sin \phi \cos^2 \phi f_{13} + \sin \theta \cos^3 \theta \cos \phi f_{14} \\ & + \sin \theta \cos^3 \theta \sin \phi f_{15}), \end{aligned} \quad (4)$$

其中 $(f_1, f_2, \dots, f_{15})$ 为 (θ_0, φ_0) 的函数, 如表 1 所示. 将 (4) 式代入 (2) 式, 再代入 (1) 式, 得到

$$\begin{aligned} H_{\text{res}} = & \frac{\omega}{\gamma} - \frac{2K_u - 4\pi M^2}{M} \cdot \frac{3 \cos 2\theta + 1}{4} \\ & - \frac{K_1}{2M} [12 \sin^2 \theta (\cos^2 \phi f_1 + \sin^2 \phi f_2) - 20 \sin^4 \theta (\cos^4 \phi f_1 + \sin^4 \phi f_2) \\ & + 2 \sin^2 \theta f_3 - 20 \sin^4 \theta \sin^2 \phi \cos^2 \phi f_3 + 6 \sin^2 \theta \sin \phi \cos \phi (f_4 + f_5) \\ & - 20 \sin^4 \theta \sin \phi \cos \phi (f_4 + f_5) + 12 \cos^2 \theta f_6 \\ & - 20 \cos^4 \theta f_6 + 2(\cos^2 \phi f_7 + \sin^2 \phi f_8) + 2 \cos^2 \theta (\sin^2 \phi f_7 + \cos^2 \phi f_8) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -20 \sin^2 \theta \cos^2 \theta (\cos^2 \phi f_7 + \sin^2 \phi f_8 + \sin \phi \cos \phi f_9) \\
& + 2 \sin^2 \theta \sin \phi \cos \phi f_9 - 20 \sin^3 \theta \cos \theta (\cos^3 \phi f_{10} + \sin^3 \phi f_{12} \\
& + \sin^2 \phi \cos \phi f_{11} + \sin \phi \cos^2 \phi f_{13}) \\
& + 2 \sin \theta \cos \theta \cos \phi (f_{11} + 3f_{14} + 3f_{10}) \\
& + 2 \sin \theta \cos \theta \sin \phi (f_{13} + 3f_{12} + 3f_{15}) \\
& - 20 \sin \theta \cos^3 \theta (\cos \phi f_{14} + \sin \phi f_{15})].
\end{aligned} \tag{5}$$

表 1

f	θ_0, φ_0	(111)	(110)
f_1	$\sin^2 \theta_0 \cos^2 \theta_0 + \cos^4 \theta_0 \sin^2 \varphi_0 \cos^2 \varphi_0$	$\frac{1}{4}$	0
f_2	$\sin^2 \varphi_0 \cos^2 \varphi_0$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$
f_3	$1 - 6 \cos^2 \theta_0 \sin^2 \varphi_0 \cos^2 \varphi_0$	$\frac{1}{2}$	1
f_4	$\frac{1}{2} \cos^3 \theta_0 \sin 4\varphi_0$	0	0
f_5	$-\frac{1}{2} \cos \theta_0 \sin 4\varphi_0$	0	0
f_6	$\sin^2 \theta_0 \cos^2 \theta_0 + \sin^4 \theta_0 \sin^2 \varphi_0 \cos^2 \varphi_0$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{4}$
f_7	$1 + 6 \sin^2 \theta_0 \cos^2 \theta_0 \sin^2 \varphi_0 \cos^2 \varphi_0 - 6 \sin^2 \theta_0 \cos^2 \theta_0$	0	1
f_8	$1 - 6 \sin^2 \theta_0 \sin^2 \varphi_0 \cos^2 \varphi_0$	0	$-\frac{1}{2}$
f_9	$\frac{3}{2} \sin^2 \theta_0 \cos \theta_0 \sin 4\varphi_0$	0	0
f_{10}	$2(\sin^3 \theta_0 \cos \theta_0 - \sin \theta_0 \cos^3 \theta_0 + 2 \sin \theta_0 \cos^3 \theta_0 \sin^2 \varphi_0 \cos^2 \varphi_0)$	$\frac{\sqrt{2}}{3}$	0
f_{11}	$-12 \sin \theta_0 \cos \theta_0 \sin^2 \varphi_0 \cos^2 \varphi_0$	$-\sqrt{2}$	0
f_{12}	$-\frac{1}{2} \sin \theta_0 \sin 4\varphi_0$	0	0
f_{13}	$\frac{3}{2} \sin \theta_0 \cos^2 \theta_0 \sin 4\varphi_0$	0	0
f_{14}	$2(\sin \theta_0 \cos^3 \theta_0 - \sin^3 \theta_0 \cos \theta_0 + 2 \sin^3 \theta_0 \cos \theta_0 \sin^2 \varphi_0 \cos^2 \varphi_0)$	0	0
f_{15}	$\frac{1}{2} \sin^3 \theta_0 \sin 4\varphi_0$	0	0

三、测量原理和方法

(5)式给出了任一晶面沿任一方向的共振场,其中 γ (或 g_{eff}), K_u 和 K_1 是三个待测

的未知量。因此只需要在满足小角近似的条件下, 选取三个不同的 (θ, φ) 方位, 测定其相应的共振场, 若能得到三个线性独立的联立方程组, 就可以同时测定 K_u 和 K_1 了。

以(111)晶面为例, 此时 $\theta_0 = 54^\circ 44'$, $\varphi_0 = 45^\circ$, 坐标轴变为如图 3 所示, 将表 1 给出的(111)晶面的诸 f 值代入(4)式, 得到

$$E_k = K_1 \left(\frac{1}{3} \cos^4 \theta + \frac{1}{4} \sin^4 \theta + \frac{\sqrt{2}}{3} \sin^3 \theta \cos \theta \cos 3\varphi \right), \quad (6)$$

代入(5)式, 得到

$$\begin{aligned} H_{\text{res}} = & \frac{\omega}{\gamma} - \frac{2K_u - 4\pi M^2}{M} \cdot \frac{3 \cos 2\theta + 1}{4} \\ & - \frac{K_1}{2M} \left(4 - 5 \sin^4 \theta - \frac{20}{3} \cos^4 \theta \right. \\ & \left. - \frac{20\sqrt{2}}{3} \sin^3 \theta \cos \theta \cos 3\varphi \right). \end{aligned} \quad (7)$$

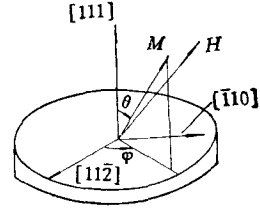


图 3

取 $\theta = 0^\circ$, 代入(7)式, 得到外场垂直于膜面时的共振场

$$H_{\perp} = \frac{\omega}{\gamma} - \frac{2(K_u - 2\pi M^2)}{M} + \frac{4}{3} \frac{K_1}{M}. \quad (8)$$

取 $\theta = 90^\circ$, 代入(7)式, 得到外场平行于膜面时的共振场

$$H_{\parallel} = \frac{\omega}{\gamma} + \frac{K_u - 2\pi M^2}{M} + \frac{1}{2} \frac{K_1}{M}. \quad (9)$$

$H_{\perp}$ 和 $H_{\parallel}$ 与 φ 无关, 改变 φ 不能得到第三个线性独立的方程, 因此对(111)晶面必须选择 $\theta \neq 0^\circ$ 和 90° 时, 测量其相应的共振场, 以得到第三个线性独立方程。这与 Enoch 等人的磁光方法在原理上是一致的, 也就是必须同时具有 $M_{\parallel}$ 和 $M_{\perp}$ 时, 才能同时测定 K_u 和 K_1 。

固定 θ , 对应于不同的 φ , 共振场有 $\cos 3\varphi$ 的变化规律。曲线的平均值对应于 $\cos 3\varphi = 0$ 。因此由测得 $H_{\text{res}}(\varphi)$ 曲线的平均值

$$H_{\varphi=0} = \frac{\omega}{\gamma} - \frac{2K_u - 4\pi M^2}{M} \cdot \frac{3 \cos 2\theta + 1}{4} - \frac{K_1}{2M} \left(4 - 5 \sin^4 \theta - \frac{20}{3} \cos^4 \theta \right), \quad (10)$$

联立(8), (9) 和 (10) 式, 就可以求得 γ (或 g_{eff}), K_u 和 K_1 了。考虑到测量误差积累的影响, 当 K_1 的符号确定后, 用改变 φ 时测出的最大和最小共振场的差来确定 $|K_1|$ 将更为精确和方便。其表达式如下:

$$H_{\theta, \max} - H_{\theta, \min} = \frac{|K_1|}{M} \frac{20\sqrt{2}}{3} \sin^3 \theta \cos \theta. \quad (11)$$

应该如何选择合适的 θ 角呢? 首先从小角近似条件出发, 要求 M 与 H 的夹角 δ 小。而

$$\delta = - \frac{1}{MH} \frac{\partial E}{\partial \theta} \approx \frac{\sin 2\theta}{C - 1.5 \cos 2\theta}, \quad (12)$$

其中

$$C = \left[2(\omega/\gamma) / \left(\frac{2K_u}{M} - 4\pi M \right) \right] - \frac{1}{2}.$$

上式是在忽略 K_1 的条件下得到的,图4给出了对应不同 C 值, δ 和 θ 的关系。同时从测量灵敏度考虑,应使面内最大与最小共振场之差尽量大,(11)式给出了 $(H_{\theta,\max} - H_{\theta,\min})$ 与 θ 的关系,如图5所示。因此,对 θ 的选择要进行综合考虑。对于通常的 C 为4—9的磁泡材料, θ 取 $50-60^\circ$ 较为合适。

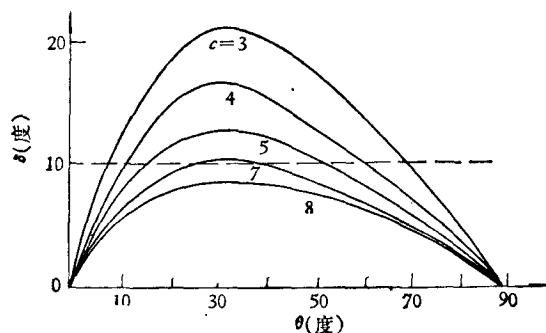


图4 对应不同的 C 值, δ 与 θ 的关系

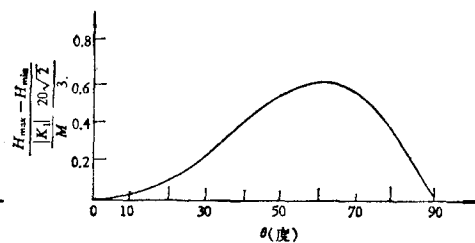


图5 $(H_{\max} - H_{\min}) / \frac{|K_1| 20\sqrt{2}}{3}$ 与 θ 的关系

我们的测量是在一套装有相敏检波的铁磁共振设备上完成的。微波频率 $f = 9277$ 兆赫。使 θ 固定的方法是采用了一个特殊的样品架,如图6所示。转盘与样品杆固定成 θ 角,样品贴在转盘上,转动转盘可以使 φ 角改变。

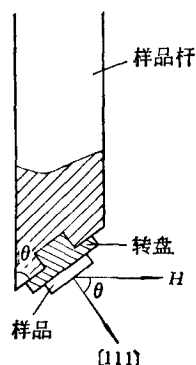


图6 样品杆示意图

四、实验结果

对于不同的样品,有三类不同的测量结果,具体分析计算如下:

1) $[111]$ 轴垂直于膜面

在一 $(\text{YSmCa})_3(\text{FeGe})_5\text{O}_{12}$ 的磁泡外延膜样品A上(其 $4\pi M = 177$ 高斯,特征长度 $l = 1.01$ 微米,厚度 $h = 6$ 微米),测得的垂直和平行于膜面的共振曲线如图7所示, $H_{\perp} = 2500$ 奥斯特, $H_{\parallel} = 3150$ 奥斯特。用 $\theta = 54^\circ 44'$ 的特制样品架测量,得到规则的 $\cos 3\varphi$ 共振场曲线,如图8所示, $H_{\text{平均}} = 3190$ 奥斯特, $H_{\max} = 3390$ 奥斯特, $H_{\min} = 2990$ 奥斯特,共振峰宽 $\Delta H \approx 180$ 奥斯特。从而求得 $K_u = 4.0 \times 10^3$ 尔格/厘米³, $K_1 = -1.8 \times 10^3$ 尔格/厘米³, $\frac{\omega}{\gamma} = 3040$ 奥斯特, $g_{\text{eff}} = 2.2$ 。由(12)式可以求得 $\delta \sim 4^\circ$,基本上满足小角近似条件 $\delta \sim \sin \delta$ 。图8中给出的三个共振场最小值的位置对应于 $3\varphi = 2n\pi$,即 $[211]$ 方向,这与X光定向给出的结果完全一致。

2) $[111]$ 轴与膜面法向有偏离

由于切磨抛等工艺因素的影响, $[111]$ 轴与膜面法向有小偏角的情形是经常发生的。Malozemoff^[10,11]等人专门讨论了由此引起的各种非单轴各向异性的测量问题。这里介绍用铁磁共振方法测量 $[111]$ 轴与膜面法向偏角和各种非单轴各向异性。

当膜面法向与 $[111]$ 轴有偏角 Δ_c 和方位角 φ_c 时,生长感生各向异性能更为普遍的

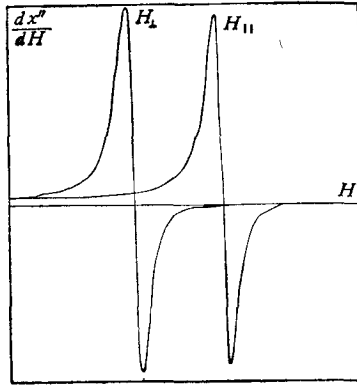


图7 样品A分别在膜面垂直和平行于外场时的共振曲线(自动记录实测曲线)

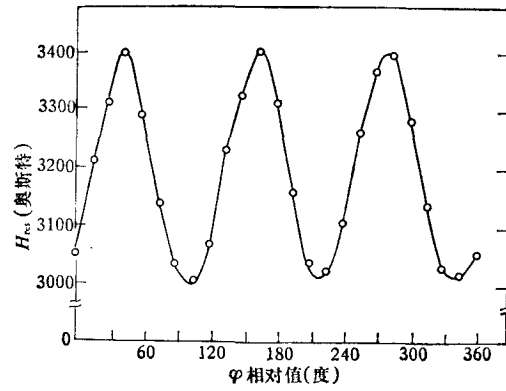


图8 样品A, 当 $\theta = 54^\circ 44'$ 时共振场随 φ 的变化

表达式为

$$E = \frac{1}{2} B_1 \alpha_{111}^2 \beta_{111}^2 + \frac{4}{3} \left(A + \frac{1}{4} B_2 \right) \alpha_{111} \beta_{111} (\alpha_{110} \beta_{110} + \alpha_{112} \beta_{112}) + \frac{\sqrt{2}}{3} \left(A - \frac{1}{2} B_2 \right) [(\alpha_{110}^2 - \alpha_{112}^2) \beta_{112} + 2 \alpha_{110} \alpha_{112} \beta_{110}] \beta_{111}^{[8]}. \quad (13)$$

这里选取 $[112]$, $[110]$ 和 $[111]$ 轴为直角坐标参考系(参看图3)。诸 α 为饱和磁化强度 M 在三个轴上的方向余弦。 A , B_1 和 B_2 为与生长感生各向异性有关的常数, 与 K_u 有简单的关系 $K_u = B/2$ (通常 B_1 和 B_2 的差别很小)。取 Δ_c 的一级近似, $\beta_{111} \approx 1$, $\beta_{110} = \Delta_c \sin \varphi_c$, $\beta_{112} = \Delta_c \cos \varphi_c$, 令

$$\Delta = \frac{4}{3} \left(\frac{A}{B_1} + \frac{1}{4} \frac{B_2}{B_1} \right) \Delta_c, \quad K_p = \frac{2\sqrt{2}}{3} \left(A - \frac{1}{2} B_2 \right) \Delta_c,$$

则相应的共振场为

$$H_{\text{res}} = \frac{\omega}{\gamma} - \frac{2K_u - 4\pi M^2}{M} \cdot \frac{3 \cos 2\theta + 1}{4} - \frac{K_1}{2M} \left[4 - 5 \sin^4 \theta - \frac{20}{3} \cos^4 \theta - \frac{20\sqrt{2}}{3} \sin^3 \theta \cos \theta \cos 3(\varphi - \varphi_c) \right] + \frac{6K_u}{M} \Delta \sin \theta \cos \theta \cos(\varphi - \varphi_u) + \frac{K_p}{2M} (3 \cos^2 \theta - 1 + 2 \operatorname{ctg}^2 \theta) \cos 2(\varphi - \varphi_p). \quad (14)$$

与(7)式比较可见, 由于膜面法向偏离 $[111]$ 轴, 不但引起对 K_u 的修正项(上式第四项)而且还附加了一项与 $\cos 2\varphi$ 有关的面内各向异性(最后一项)。式中的 φ_u 和 φ_p 是由于 φ_c 而引起的方位角的相角差。当 $\theta = 54^\circ 44'$ 时, 共振场为

$$H_{\text{res}} = \frac{\omega}{\gamma} + \frac{2\sqrt{2} K_u \Delta}{M} \cos(\varphi - \varphi_u) - \frac{K_1}{2M} \left[\frac{28}{27} - \frac{80}{27} \cos 3(\varphi - \varphi_c) \right] + \frac{K_p}{2M} \cos 2(\varphi - \varphi_p). \quad (15)$$

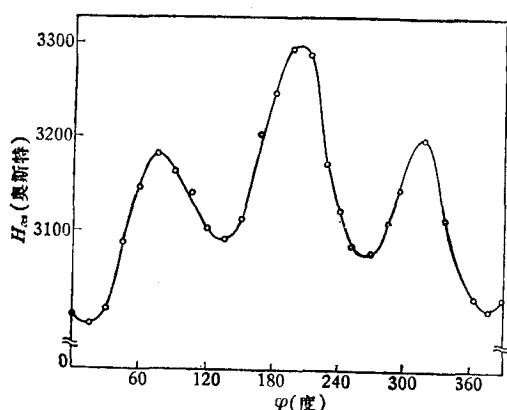


图9 [111] 轴与膜面法线偏角 Δ_c , $\theta = 54^\circ 44'$ 的共振场曲线

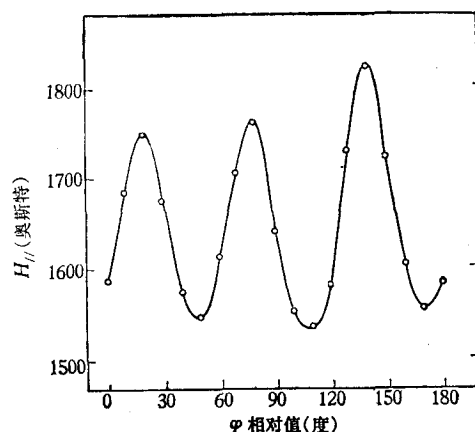


图10 样品C的共振场 $H_{||}$ 随 φ 的变化

在另一 $(\text{YSmCa})_3(\text{FeGe})_5\text{O}_{12}$ 的磁泡外延膜样品B上 ($4\pi M = 267$ 高斯, 特征长度 $l = 0.471$ 微米, 厚度 $h = 3$ 微米), 测量了 $\theta = 54^\circ 44'$ 的共振场随 φ 的变化曲线, 如图9所示。对曲线作傅里叶级数展开, 得到了与(15)式相应的谐波分量值分别为

$$\begin{aligned} \frac{\omega}{\gamma} - \frac{14}{27} \frac{K_1}{M} &= 3150 \text{ 奥斯特}, & \frac{40}{27} \frac{K_1}{M} &= -71 \text{ 奥斯特}, \\ \frac{K_p}{2M} &= -9 \text{ 奥斯特}, & \frac{2\sqrt{2}}{M} \frac{K_u \Delta}{M} &= -57 \text{ 奥斯特}. \end{aligned}$$

从而求得 $K_1 = -1.0 \times 10^3$ 尔格/厘米³, $K_p = -4 \times 10^2$ 尔格/厘米³, $\frac{\omega}{\gamma} = 3125$ 奥斯特, 相应的 $g_{\text{eff}} = 2.1$. 另外, 测量了 $\theta = 0^\circ$ 时的共振场 $H_\perp = 2200$ 奥斯特, 因此可以求出 $K_u = 1.2 \times 10^4$ 尔格/厘米³. 感生各向异性偏开 [111] 轴的角度 $\Delta \approx 2^\circ$, 而膜面的法向与 [111] 轴的偏角只有 $\Delta_c \approx 0.6^\circ$, 这两偏角的放大因子 $\Delta/\Delta_c \approx 3.1$. 另外还可以给出 $A/B \approx -2.1$.

由(12)式可以得到 $\delta \sim 7^\circ$, 尚能满足小角近似条件。

3) 当小角近似不能满足时, 应在铁磁共振的表达式中考虑二级近似项^[9]. 任意 θ 的表达式十分繁杂, 这里只能给出 $\theta = 90^\circ$ 的表达式

$$\left(\frac{\omega}{\gamma}\right)^2 = H_\perp^2 - \frac{H_\parallel}{M} [(K_u - 2\pi M^2) + K_1] + \frac{2K_1^2}{M^2} \cos 6\varphi. \quad (16)$$

上式说明考虑了二级近似项以后, 即使 $\theta = 90^\circ$ 时共振场也要随 φ 变化. 前面的两个样品基本上满足小角近似, 没有观察到这种变化规律. 而在一成份为 $(\text{YEuCa})_3(\text{FeGeSi})_5\text{O}_{12}$ 的样品C上果然观察到 H_{res} 随 φ 有 $\cos 6\varphi$ 的变化规律, 如图10. 这是由于这一样品的 $g \sim 5$, 共振场出现在很低的范围. 由于 K_1 的存在, 仍使 M 不能完全躺在膜面内, 因此 $H_\parallel$ 出现 $\cos 6\varphi$ 的变化.

在(3)式中引入 K_2 项, 则 $H_\parallel$ 也相应地出现 $\cos 6\varphi$ 项, 因此这种 6 重对称的变化规律包含有 $\frac{K_2}{M}$ 和 $\left(\frac{K_1}{M}\right)^2$ 的共同影响, 从共振场随 φ 变化曲线的傅里叶分量分析等方法可以

得到 K_1 和 K_2 , 这里没做进一步的分析。

五、结 论

1. 此方法不仅可以测定 K_u , K_1 和各种非单轴各向异性, 而且还可以确定晶面内晶轴的方向, 确定晶轴与膜面法线的偏角, 确定感生各向异性的主轴的方向等。本文以磁泡外延膜的测量结果为例, 证明这种方法是可行的。

2. 对通常的样品 H_H 随 φ 的变化是很小的, 约几个奥斯特, 难以准确测定。用 θ 倾角的特殊样品架测量的优点就在于把共振场 H_{res} 随 φ 的变化放大了, 可达几十奥斯特, 从而可以较容易地测出各种非单轴各向异性如: K_1 , K_u , Δ , K_p 等。当然这种方法也引入了一定的测量误差。

3. 实验中往往得到很复杂的 $H_{res}(\varphi)$ 曲线, 原则上都可以用傅里叶级数展开的方法, 在合理的近似程度下, 得到正确的结果。

4. 此方法与通常的铁磁共振测量方法相同, 可以得到 g_{eff} 和峰宽 ΔH , 可以为磁性和微观弛豫机制的研究提供数据。由 ΔH 值计算磁泡材料的畴壁运动迁移率 μ 已成为常用的方法。

作者诚挚地感谢樊世勇同志提供了样品和静态磁泡参数数据, R. F. Soohoo 先生提出了有益的意见以及与毛廷德同志进行的有益的讨论。

参 考 文 献

- [1] A. J. Kurtzig and F. B. Hagadorn, *IEEE Trans. Magnetics*, **Mag-7**(1971), 473.
- [2] A. B. Smith, M. Kestigian and W. R. Bekebrede, *AIP Conf. Proc.*, **10**(1972), 309.
- [3] W. T. Stacy, M. M. Janssen, J. M. Robertson and M. J. G. Van Hout, *AIP Conf. Proc.*, **10**(1972), 314.
- [4] G. S. Almasi, E. A. Giess, R. J. Hendel, G. E. Keefe, Y. S. Lin and M. Slusarczuk, *AIP Conf. Proc.*, **24**(1974), 630.
- [5] H. Jouve, *J. A. P.*, **50**(3) (1979), 2246.
- [6] R. D. Enoch and M. E. Jones, *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, **8**(1975), 334.
- [7] A. Hubert, A. P. Malozemoff and J. C. Deluca, *J. A. P.*, **45**(1974), 3562.
- [8] A. P. Malozemoff and J. C. Deluca, *J. A. P.*, **45**(1974), 4586.
- [9] 贾惟义, 张鹏翔, *物理学报*, **25**(1976), 254.
- [10] A. P. Malozemoff, Lecture at Winter School in New Magnetic Materials, Kocierz, Poland, April (1975).
- [11] R. A. Abram, R. J. Fairholme, M. D. R. Tench and K. A. Gehring, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **8**(1975), 94.

SIMULTANEOUS DETERMINATION OF K_u AND K_1 OF THIN FILMS BY FERROMAGNETIC RESONANCE

LI JING-YAN ZHENG DE-JUAN

(Institute of Physics, Academia Sinica)

ABSTRACT

A formula for the resonance field along an arbitrary direction in a film of a cubic crystal, which possesses magneto-crystalline anisotropy (K_1) as well as an uniaxial anisotropy (K_u) with the easy axis normal to the film plane, has been derived.

On the basis of this formula, a method for the simultaneous measurement of (K_u) and (K_1) is proposed. An example for an (111) film is considered specifically.