

石榴石磁泡薄膜各向异性常数 K_u 和 K_1 的转矩法测量*

唐贵德

韩宝善

河北师范大学物理系石家庄, 050016 中国科学院物理研究所, 北京, 100080

1989年5月17日收到

本文详细研究了 GGG ($Gd_3Ga_5O_{12}$) 单晶基片的磁转矩与其几何参量及有关物理参量的关系, 提出了由转矩曲线测量石榴石磁泡薄膜单轴各向异性常数 K_u 和立方磁晶各向异性常数 K_1 , 过程中扣除基片影响的一种方法. 在此基础上利用二元回归法由实测的转矩曲线求出 K_u 和 K_1 , 以及 K_u 和 K_1 的温度关系曲线.

PACC: 7570K; 7530G; 7590

一、引 言

单轴各向异性常数 K_u 和立方各向异性常数 K_1 是石榴石单晶磁泡膜的两个重要参量. 这两个参量的现有测量方法主要分为三类: 转矩法, 铁磁共振法和磁光法.

在转矩法中, 又有几种不同的测试方法. 1973年, Hagedorn 等人^[1]报道了用转矩法测量 K_u 的方法. Heilner 等人^[2]提出了 K_u 和 K_1 的同时测量法. 他们先把实验测得的 $L-\theta_0$ 曲线 (L 为样品转矩, θ_0 为外磁场 H 与易磁化轴的夹角) 改画成 $L-\theta$ 曲线 (θ 为磁泡薄膜的饱和磁化强度 $4\pi M$ 与易磁化轴夹角), 再利用 FORTRON 程序进行数据处理. 1976年 Miyajima 等人^[3]以坡莫合金为例, 提出使 θ_0 等于 45° , 通过作 $(L/H)^2$ 与 L 的关系曲线同时求 $4\pi M$ 与 K_u . 此方法也被用于磁泡膜的测量. 1979年, Wielinga^[4]提出利用转矩极大值求 M 和 K_u . 1980年, 毛廷德等人^[5]提出利用固定转矩值, 改变外磁场幅度的方法同时测量 M 和 K_u ; 用固定外磁场下两组 (θ, L) 值同时求 K_u 和 K_1 .

在上述各方法中, 只有文献[1]和文献[5]提出用与磁泡样品基片尺寸相同的另一基片补偿测量过程中样品基片的影响. 然而, 要找到合适的补偿基片实际上是比较困难的. 其余文献都没有讨论基片的影响.

本文详细研究了基片的转矩与有关参量的关系, 提出了磁泡膜各向异性常数 K_u 和 K_1 测量过程中扣除基片影响的方法, 给测量工作带来了方便. 在数据处理上采用二元回归法对 $L-\theta_0$ 曲线上从 $0-360^\circ$ 的大量数据借助计算机进行处理, 从而提高了数据的精确度.

* 国家自然科学基金资助的课题.

二、测量原理

1. 磁泡膜的磁转矩

对于(111)晶面的外延磁泡薄膜,使膜处于 X - Y 平面,取图 1 所示的坐标系. 在转矩测量中,如将样品沿 $[\bar{1}10]$ 晶向垂直悬挂,则可使外磁场在 $[111]$ 和 $[11\bar{2}]$ 晶向构成的 X - Z 平面内转动,如图 2 所示. 在这种情况下,按图 1, $\phi = \phi_0 = 0$,于是磁泡膜的总能量密度

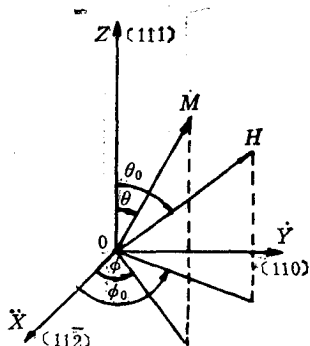


图 1 坐标系 M 和 H 的方位角与极角分别为 (ϕ, θ) 和 (ϕ_0, θ_0)

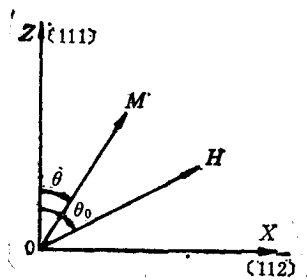


图 2 样品沿 $[\bar{1}10]$ 方向垂直悬挂后外磁场 H 在 X - Z 平面内转动

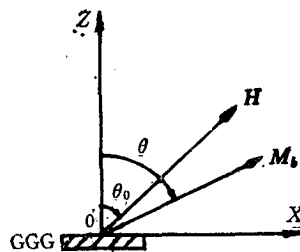


图 3 GGG 基片的磁化 θ_0 和 θ' 分别为外场 H 和磁化强度 M_0 的极角

$$W = K_u \sin^2 \theta + K_1 \left(\frac{1}{3} \cos^4 \theta + \frac{1}{4} \sin^4 \theta + \frac{\sqrt{2}}{3} \sin^3 \theta \cos \theta \right) + 2\pi M^2 \cos^2 \theta - MH \cos(\theta_0 - \theta), \quad (1)$$

上式等号右端四项分别为单轴各向异性能、立方各向异性能、退磁场能和外磁场能; K_u 为单轴各向异性常数; K_1 为立方各向异性常数; M 为磁化强度, H 为外磁场强度. 外磁场 H 作用于磁化强度 M 上而产生的磁转矩为 $MH \sin(\theta_0 - \theta)$, 如果膜的体积为 V_f , 则其总转矩为

$$L_f = V_f MH \sin(\theta_0 - \theta). \quad (2)$$

利用系统的平衡条件 $\partial \omega / \partial \theta = 0$ 和(1), (2)两式可得

$$L_f = V_f \left[(K_u - 2\pi M^2) \sin 2\theta \right]$$

$$+ K_1 \left(-\frac{4}{3} \cos^3 \theta \sin \theta + \sin^3 \theta \cos \theta + \sqrt{2} \sin^2 \theta \cos^2 \theta - \frac{\sqrt{2}}{3} \sin^4 \theta \right) \Big]. \quad (3)$$

2. 基片的磁转矩

(111)面磁泡膜是在(111)晶面 GGG 基片上液相外延得到的. 它是顺磁材料, 无单轴和磁晶各向异性, 但在外磁场作用下会产生磁化强度 M_b . 由于 GGG 为圆形薄片, 所以在图 3 所示的坐标系中, 当 H 在 $X-Z$ 平面内旋转时, 基片的总能量密度

$$W_b = \frac{1}{2} M_b^2 (N_{\perp} \cos^2 \theta' + N_{\parallel} \sin^2 \theta') - M_b H \cos(\theta_0 - \theta'), \quad (4)$$

上式等号右端两项分别为退磁能和外磁场能, N_{\perp} 和 N_{\parallel} 分别为基片在垂直和平行方向的退磁因子. 外磁场 H 作用于体积为 V_b 的基片上所产生的磁转矩为

$$L_b = V_b M_b H \sin(\theta_0 - \theta'). \quad (5)$$

利用基片的平衡条件 $\partial \omega_b / \partial \theta = 0$ 和(4), (5)两式可得

$$L_b = -2\pi \chi_b^2 H^2 V_b \left(\frac{N_{\text{eff}}}{4\pi} \right) \sin 2\theta', \quad (6)$$

式中 $\chi_b = M_b / H$ 为基片的磁化率, $N_{\text{eff}} = N_{\perp} - N_{\parallel}$ 为有效退磁因子. 根据文献[6], 若基片直径为 D , 厚为 h_b , 当 $m = D/h_b \gg 1$ 时, 可导出

$$N_{\text{eff}} = 4\pi \left(1 - \frac{3\pi}{4m} + \frac{3}{m^2} \right). \quad (7)$$

显然, 磁泡样品的磁转矩为磁泡膜的转矩与基片转矩之和, 即

$$L = L_f + L_b. \quad (8)$$

可见, 用磁转矩法测量磁泡膜的 K_u 和 K_1 及其温度关系的关键是, 在测得的样品磁转矩 L 中准确地扣除基片的转矩 L_b . 因而必须系统地研究基片的转矩与其体积、晶向、几何参量 m 及温度等关系. 此外, 对不同样品确定合适的外磁场强度以及采用有效的数学方法从转矩曲线 ($L-\theta_0$) 直接求出 K_u 和 K_1 也是重要的问题.

三、实验与讨论

在本工作中, 采用 T-2-10 转矩仪, 测量了两种磁泡材料共 12 个样品的 K_u 和 K_1 的温度关系. 测量时, 样品沿 $[110]$ 方向铅直悬挂于外磁场 H 中. H 的初始方向垂直于样品的 (111) 面, 当它在 $[111]$ 和 $[11\bar{2}]$ 晶向构成的水平面内匀速转动时得到样品的转矩曲线 ($L-\theta_0$ 曲线).

1. 外磁场的选择

因为磁泡膜具有很强的单轴各向异性, 易磁化轴 $[111]$ 垂直于膜面, 饱和磁化强度 M 倾向于躺在 $[111]$ 方向, 如图 2 所示. 而基片是无单轴各向异性的圆片, 在退磁能的作用下, 其磁化强度 M_b 倾向于躺在基片平面内, 如图 3 所示. 所以基片的转矩与膜的转矩方向相反. 由(2), (6)两式可知, 基片和膜的转矩峰值与外磁场的关系分别为

$$|(L_b)_{\max}| \propto H^2$$

和

$$|(L_f)_{\max}| \propto H.$$

可见,随着外磁场的增加,基片转矩的幅值要比膜的增加得迅速.由于基片是顺磁材料,其磁化率 χ_b 很小,当 H 较小时, $|L_b| < |L_f|$. 这时样品转矩的幅值 $|L| = |L_f| - |L_b|$, 它随 H 的增加而减小.有一些样品,基片很薄,即使转矩仪磁场增至最大值(10kOe)仍表现为 $|L_b| < |L_f|$, 如图 4(a) 所示. 另一些样品的基片较厚,当磁场 H 大于某值时, $|L_b| > |L_f|$. 这时样品的转矩幅值 $|L| = |L_b| - |L_f|$, 它随 H 的增加而增加,如图 4(b) 所示. 为了使 $|L|$ 适当的大些,以便减小测量和读数误差,对前一类样品选择 $H = 5\text{kOe}$, 对后一类样品选择 $H = 10\text{kOe}$ 进行测量较好.

当然,基片还受到磁泡膜磁矩的作用,但是考虑到磁泡膜厚度只有几微米,面积一般小于 1cm^2 , 饱和磁化强度为几百高斯,因而与 $5-10\text{kOe}$ 的外磁场相比,磁泡膜磁矩的作用是完全可以忽略的.

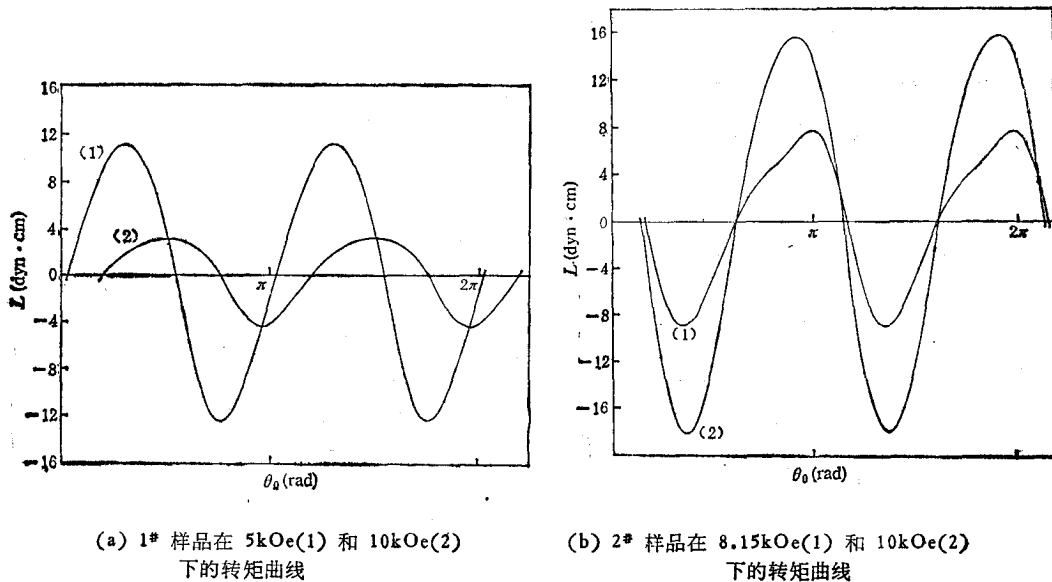


图 4

2. 基片的磁转矩

实验测量了 14 个基片在 10kOe 下的转矩曲线,它们都是很好的正弦曲线.将基片的体积和其转矩曲线的峰值代入(6)式,同时把其几何参量 m 代入(7)式,从而可求出磁化率 χ_b 与几何参量 m 的关系,如图 5 所示.可见,各 χ_b 值都偏离平均值很少.当 $m > 15$ 时(对于磁泡样品来说这个条件很容易满足),偏差小于 2%.

由于基片的体积各不相同,测量时悬挂方向是面内任一方向,所以图 5 说明基片的转矩只与体积成正比而与晶向无关.

在(6)式中,若取近似,令 $\theta' = \theta_0$ 则

$$L_b = -2\pi\chi_b^2 H^2 V_b \left(\frac{N_{eff}}{4\pi} \right) \sin 2\theta_0 \quad (9)$$

由(5), (6)两式可得,该近似的最大误差 $\Delta\theta'_{max} \leq 2\pi\chi_b(N_{eff}/4\pi) \approx 3 \times 10^{-3}$, 其中用到了关系式 $M_b = \chi_b H$ 和图5中 χ_b 的平均值.

3. 转矩曲线对 θ_0 轴的不对称性

仔细观察图4, 可发现转矩曲线对 θ_0 轴并不对称, 在 θ_0 轴的一侧 L 的峰值大些, 另一侧峰值小些. 为究其原因, 由(3)式推得

$$L_t = V_t \left[(K_u - 2\pi M^2) \sin 2\theta + K_1 \cdot \left(-\frac{1}{12} \sin 2\theta - \frac{7}{24} \sin 4\theta \right) + \frac{\sqrt{2}}{6} K_1 (\cos 2\theta - \cos 4\theta) \right]. \quad (10)$$

因石榴石磁泡材料的 $K_1 < 0$, $K_u > 2\pi M^2$, 所以当 $0 < \theta < 45^\circ$ 时,

$$|L_t(-\theta)| > |L_t(\theta)|. \quad (11)$$

又因为 $H > 5\text{kOe}$ 时 θ_0 与 θ 相差很少, 所以(11)式可写成

$$|L_t(-\theta_0)| > |L_t(\theta_0)|. \quad (12)$$

由此可见, 样品转矩曲线的不对称性是由于 L_t 的不对称性造成的. 从转矩曲线读数时应注意到这种不对称性.

4. 单轴各向异性常数 K_u 和立方各向异性常数 K_1 的计算

从(8), (9)两式可得

$$L_t = L - L_b = L + 2\pi\chi_b^2 H^2 V_b (N_{eff}/4\pi) \sin 2\theta_0 \quad (13)$$

由(2)式可得

$$\theta = \theta_0 - \sin^{-1}(L_t/V_t M H). \quad (14)$$

令

$$x_1 = \sin 2\theta,$$

$$x_2 = -\frac{4}{3} \cos^3 \theta \sin \theta + \sin^3 \theta \cos \theta + \sqrt{2} \sin^2 \theta \cos^2 \theta - \frac{\sqrt{2}}{3} \sin^4 \theta, \quad (15)$$

$$K = K_u - 2\pi M^2. \quad (16)$$

从(3)式可得

$$x_1 K + x_2 K_1 = L_t/V_t. \quad (17)$$

把利用显微镜观测法得到的膜的饱和磁化强度 $4\pi M$ 和其它各参量以及从样品转矩曲线上读出的大量 (θ_0, L) 数据输入计算机, 根据(13)至(17)式, 采用二元回归法即可求出磁泡膜的各向异性常数 K_u 和 K_1 .

5. 关于 K_u 和 K_1 温度关系的测量

由典型的基片在若干不同温度下的转矩曲线计算出的基片磁化率 χ_b 随温度的变化

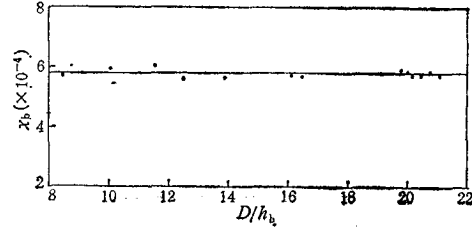


图5 GGG 片的磁化率 χ_b 与其几何参量 $m(=D/h_b)$ 的关系

曲线示于图 6。利用图 6 数据可以扣除不同温度测量中基片的影响,从而算出不同温度下磁泡膜的 K_u 和 K_1 。成份为 $(Y\text{SmCa})_3(\text{FeGe})_5\text{O}_{12}$ 的 2# 样品的 K_u 和 K_1 的温度关系曲线如图 7 所示。

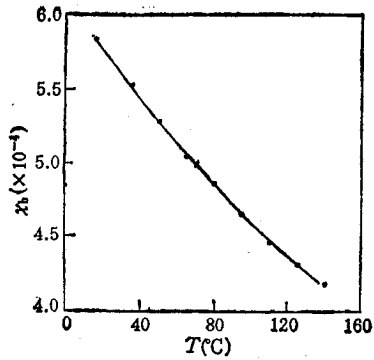


图 6 基片磁化率的温度关系

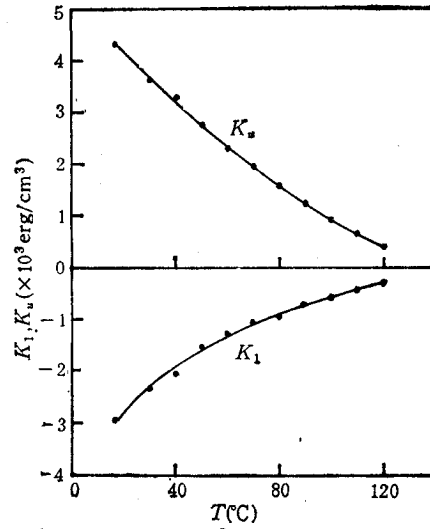


图 7 2# 样品石榴石膜的 K_u 和 K_1 的温度关系

6. 可靠性的讨论

把测得的 K_u 和 K_1 代入(3)式,可算出 $L_f-\theta$ 关系的理论值。2# 样品的实验 $L_f-\theta$ 曲线经(13)和(14)式可得到 $L_f-\theta$ 实验曲线,如图 8 实线所示,可见两者符合得很好。

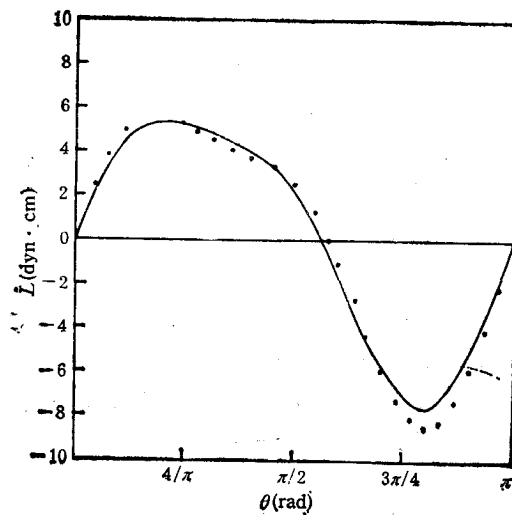


图 8 2# 样品的 $L_f-\theta$ 的关系 实线为实验值;虚线为理论值

感谢李晓明的讨论和帮助,并感谢林骏在本方法可靠性的论证工作中所做的大量的数据处理工作。

- [1] F. B. Hagedorn, S. L. Blank, R. L. Barns, *Appl. Phys. Lett.*, 22(1973), 209.
- [2] E. J. Heilner, W. H. Grodkiewicz, *J. Appl. Phys.*, 44(1973), 4218.
- [3] H. Miyajima, K. Sato, *J. Appl. Phys.*, 47(1976), 4669.
- [4] T. Wielinga, *J. Appl. Phys.*, 50(1979), 4888.
- [5] 毛廷德,奚卫,第一届全国磁泡会议论文,北京,(1980).
- [6] 郭贻诚,铁磁学,高等教育出版社,(1965),185页.

DETERMINATION OF THE ANISOTROPY CONSTANTS K_u AND K_1 OF GARNET BUBBLE FILMS BY MEASURING TORQUE CURVES

TANG GUI-DE

Department of Physics, Hebei Normal University, Shijiazhuang, 050016

HAN BAO-SHAN

Institute of Physics, Academia Sinica, Beijing, 100080

(Received 17 May 1989)

ABSTRACT

The dependence of the magnetic torque of single crystal GGG ($Gd_3Ga_5O_{12}$) substrates on their geometry and some related physical parameters were studied. A method was proposed to deduce the substrate contribution in determining the uniaxial anisotropy constant K_u and magnetocrystalline one K_1 . Both K_u and K_1 can be acquired from the magnetic torque curves by employing the two-variable regression and using computer. As example, the measured curves of K_u and K_1 as a function of temperature were presented.

PACC: 7570K; 7530G; 7590