文章编号:1000-5773(2013)06-0942-04

压强对 Ce:YIG 晶体铁磁共振及 Faraday 转动的影响*

杨　丹,张国营,胡　风,陈　辉,黄逸佳

(中国矿业大学理学院,江苏徐州　221008)

摘要:研究了 Ce:YIG 晶体中与交换作用等效的分子场以及阻尼系数随晶体生长环境压强的变化,给出了定量关系。据此研究了该晶体的铁磁共振线宽和 Ce^{3+} 离子的法拉第旋转角随压强的变化,在压强为 1.33～13.30 Pa 范围内,计算得到的 Ce:YIG 晶体的铁磁共振线宽以及 Ce^{3+} 离子的法拉第旋转角与实验符合较好。结果表明,Ce:YIG 晶体的磁性和磁光性能都对压强有一定的依赖性,适当控制晶体生长环境压强的大小,对制备出高性能的磁光材料是重要的。

关键词:Ce:YIG 晶体;压强;阻尼系数;共振线宽;Faraday 转动

中图分类号:O482.51　　**文献标识码**:A

1　引　言

掺铈石榴石 Ce:YIG 晶体,因其具有优良的磁性和大的本征 Faraday 转动(FR)角,是很有前途的铁磁共振和磁光材料,从而得到了实验和理论工作者的高度重视,已对其进行了大量研究[1-9]。在这些研究中,人们探讨了 Ce:YIG 铁磁共振与压强及磁场等的关系[1-4],FR 与入射光频率、温度及磁场的关系[5-9],为该材料的实际应用奠定了很好的基础。但在以往的理论研究中,压强对 Ce:YIG 晶体磁性及磁光性质影响的研究较少。在实际应用中,不同压强条件下制备的 Ce:YIG 晶体,因其内部原子间距有微弱差别,导致其磁性和磁光性能也有所不同。因而,研究晶体生长过程中,环境压强对该材料磁性和磁光性能影响的规律和机理是必要的。本研究首先探讨压强对 Ce:YIG 晶体中与交换作用等效的分子场以及阻尼系数的影响,进而研究不同压强下 Ce:YIG 晶体的铁磁共振线宽及法拉第效应,理论结果与实验值符合较好。

2　共振线宽计算

在 Ce:YIG 晶体中,磁化矢量绕恒定磁场运动,运动时存在阻尼力矩,将会产生铁磁共振的现象,通常其共振线宽 ΔH 可表示为[10]

$$\Delta H = \frac{2\lambda(p)H_{\mathrm{m}}(p)}{\gamma M} \tag{1}$$

式中:γ 为旋磁比,其大小为 $2.211\times10^{5}\ (\mathrm{A/m})^{-1}\cdot\mathrm{s}^{-1}$[10];$M$ 为 Ce^{3+} 离子在 Ce:YIG 晶体中的磁矩,其值为 0.038 μ_{B}/ion[9];λ 为阻尼系数;H_{m} 为晶体内部的分子场。由文献[11]可知,λ 与磁场 H_{m} 的大小相关。由于交换作用对原子间距非常敏感,我们认为加压会使原子间距产生微弱变化,导致 H_{m} 与晶

* **收稿日期**:2011-12-19;**修回日期**:2012-06-26

基金项目:中央高校基础研究基金(2013XK04)

作者简介:杨　丹(1988—),女,硕士研究生,主要从事晶体磁和磁光效应研究. E-mail:283900413@qq.com

通讯作者:张国营(1957—),男,教授,主要从事晶体磁性和磁光效应研究. E-mail:zhang57168@sina.com.cn

体生长过程中的环境压强 p 有关。因此，H_m 应该是压强 p 的函数，λ 亦是 p 的函数。由(1)式可以看出，要想从理论上研究共振线宽 ΔH 随压强 p 的变化，必须知道阻尼系数 λ 和分子场 H_m 随压强 p 变化的关系。由文献[12]可知，在研究阻尼系数 λ 对稀土石榴石晶体磁畴形成的影响时，阻尼系数在 0.6～1.6 之间取值，并且 λ 在 1.0～1.2 之间时，对磁畴的改变速度及趋向饱和状态最显著。而在我们研究的压强范围内，λ 随压强变化时，其取值符合上述条件的函数关系是一个简单的指数关系。因此，初步认为 λ 与 p 呈指数关系，其形式为

$$\lambda = a_1 + b_1 e^{c_1 p} \tag{2}$$

式中：a_1、b_1、c_1 是常数。依据文献[12]对 λ 的取值范围，确定系数 a_1、b_1、c_1 的值分别为 0.82、1.39、$-0.602\ \mathrm{Pa^{-1}}$。

根据(1)式和(2)式以及实验测量的共振线宽 ΔH 随压强 p 的变化曲线，确定了 H_m 随压强 p 的变化形式为

$$H_m = a_2 + b_2 p + c_2 p^2 + d_2 p^3 \tag{3}$$

式中：a_2、b_2、c_2、d_2 是常数。由共振线宽的实验数据[1]，拟合得到 a_2、b_2、c_2、d_2 的最佳值分别为 8437.6 kA/m、2477.8 kA/(m·Pa)、-360 kA/(m·Pa^2)、12.519 kA/(m·Pa^3)。

利用(1)式～(3)式，在压强 1.33～13.30 Pa 范围内，计算出的铁磁共振线宽 ΔH 随压强 p 的变化曲线见图 1，为便于比较，实验值[1]也一并给出。

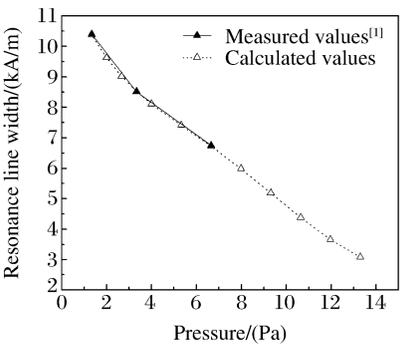


图 1　Ce:YIG 晶体铁磁共振线宽随压强的变化

Fig. 1　Variation of the resonance line width of Ce:YIG versus pressure

3　Faraday 转动的计算

在 Ce:YIG 晶体中，Ce^{3+} 离子的哈密顿为

$$H = H_0 + H_c + H_{ex} \tag{4}$$

式中：H_0 是自由 Ce^{3+} 离子的哈密顿，H_c 和 H_{ex} 分别是晶体场和交换作用哈密顿，表示为

$$H_c = \sum_{kq} A_{kq} r^k Y_{kq}(\theta, \varphi) \tag{5}$$

$$H_{ex} = 2\mu_B H_m \cdot S_z \tag{6}$$

式中：$A_{kq} r^k$ 为晶场参数，H_m 是与交换作用等效的分子场，μ_B 为玻尔磁子，S 是自旋角动量算符。

由于晶体场对压强的敏感程度远小于交换作用，作为初步近似，忽略了压强对晶场参数的影响。按照文献[9]给出的晶场参数，通过解相应的久期方程，可得到在 Ce:YIG 晶体中 Ce^{3+} 离子的晶场能级 $E_g^{(0)}$ 和波函数，其较低的几个能级值分别为：-2321、-1655、-1236、47、448、1574、3142 $\mathrm{cm^{-1}}$。

将(3)式代入(6)式，通过解下述久期方程，可得到在 Ce:YIG 晶体中，Ce^{3+} 离子经分子场作用后的塞曼能级和波函数

$$\| \langle \varphi_i | H_{ex} | \varphi_j \rangle - E_g^{(1)} \delta_{ij} \| = 0 \tag{7}$$

式中：$|\varphi_i\rangle$、$|\varphi_j\rangle$ 是晶场微扰波函数，塞曼劈裂能级和波函数分别用 $E_g^{(1)}$ 和 $|g\rangle$ 表示，经过晶场和分子场劈裂的能级用 $E_g = E_g^{(0)} + E_g^{(1)}$ 表示。

在可见和近红外波段，Ce:YIG 晶体的磁光 FR 主要由 Ce^{3+} 离子内部 $4f \rightarrow 5d$ 电偶极跃迁引起，而磁偶极跃迁很小，通常被忽略。由电偶极跃迁引起的单位长度的 FR 为[13]

$$\theta_F = \frac{N\pi(\bar{n}^2+2)^2}{9\bar{n}c\hbar} \sum_{ng} \frac{\omega^2(\omega_{ng}^2 - \omega^2 - \Gamma_{ng}^2)A_{ng}}{(\omega_{ng}^2 - \omega^2 + \Gamma_{ng}^2)^2 + 4\omega^2\Gamma_{ng}^2} \rho_g \tag{8}$$

944 高 压 物 理 学 报 第 27 卷

式中：N 是单位体积内的稀土离子数，$\bar{n}$ 是平均折射率，ω 是入射光角频率，$\hbar\omega_{ng}$ 是激发态和基态能级之差，$\sum_{ng}$ 表示对基态和激发态求和。Γ_{ng} 是谱线宽度，其取值由文献[14]给出

$$A_{ng} = |\langle n|V_-|g\rangle|^2 - |\langle n|V_+|g\rangle|^2 \quad (9)$$

式中：$|g\rangle$ 和 $|n\rangle$ 分别是基态和激发态波函数，$eV_{\mp} = e(x \mp iy)$ 为左右圆偏振光的电偶极跃迁矩阵元，ρ_g 是粒子基态的占有概率，其表示为

$$\rho_g = e^{-E_g/(kT)} / \sum_g e^{-E_g/(kT)} = \rho_0 e^{-E_g/(kT)} \quad (10)$$

由(8)式计算得到的 FR 随压强的变化关系见图 2。

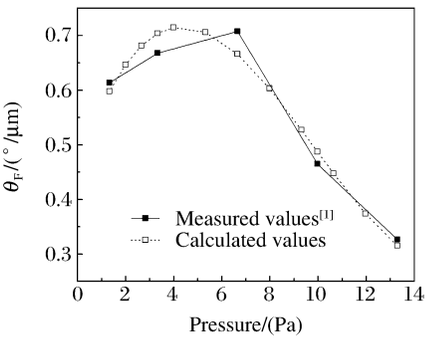


图 2 在 Ce:YIG 晶体中 Ce^{3+} 离子 Faraday 旋转随压强的变化

Fig. 2 Variation of the Faraday rotation of Ce^{3+} ions versus pressure in Ce:YIG

4 分析讨论与结论

由图 1、图 2 可以看出，计算的 Ce:YIG 晶体铁磁共振线宽和 Ce^{3+} 离子 Faraday 旋转随晶体生长过程中环境压强的变化与实验值符合较好。这表明，假设的阻尼系数和分子场随压强的变化关系是可信的。在晶体生长过程中，环境压强改变了阻尼作用的强度，阻尼系数在 1.33～13.30 Pa 压强之间呈减小趋势；进一步增加压强，阻尼作用趋近饱和，并且饱和值是 0.82。

在 Ce:YIG 晶体中，不同磁性离子的电子之间存在交换作用，该交换作用可等效为一个分子场 H_m。由于交换作用对原子间距非常敏感，而生长过程的环境压强的变化可能使原子间距产生微弱改变，导致本来饱和的分子场随压强的变化而变化。该分子场在压强为 5.32 Pa 附近变化最为强烈，Ce^{3+} 离子的 FR 也最大。随环境压强的继续增大，晶体薄膜中原子间距也变大，分子场的作用也越来越小，导致晶体的铁磁共振线宽和 Ce^{3+} 离子的 FR 较快减小。因此，在晶体生长过程中，适当的控制环境压强的大小，有利于得到性能更为优良的磁光材料。

在图 2 中，理论值和实验值的误差可能是忽略环境压强对晶体场的影响所致。当压强小于 1.33 Pa 时，由于缺乏实验数据，压强对该晶体磁性质的影响尚需进一步研究。

References:

[1] Kim H, Grishin A M, Rao K V, et al. Ce-substituted YIG films grown by pulsed laser deposition for magneto-optic waveguide devices [J]. IEEE Trans Magn, 1999, 35(5): 3163-3165.

[2] Rodrigue G P, Meyer H, Jones R V. Resonance measurements in magnetic garnets [J]. J Appl Phys, 1960, 31(5): 376-382.

[3] Reyher H J, Faust B, Sugg B, et al. Optically detected magnetic resonance via the magnetic circulai dichroism of absorption of cerium impurities in bulk paramagnetic terbium gallium garnet [J]. J Phys: Condense Matter, 1997, 9(42): 9065-9082.

[4] McKinstry, Kevin D, Patton C E, et al. Low power nonlinear effects in the ferromagnetic resonance of yttrium iron garnet [J]. J Appl Phys, 1985, 58(2): 925-929.

[5] Leycuras C, Le Gall H, Desvignes J M, et al. Magnetic and magnetooptical properties of cerium YIG single crystal [J]. IEEE Trans Magn, 1985, 21(5): 1660-1662.

[6] Gomi M, Satoh K, Furuyama H, et al. Sutter deposition of Ce-substituted iron garnet films with giant magneto-optical effect [J]. IEEE Trans Magn, 1990, 5(4): 294-230.

[7] Xu Y, Zhang G Y, Duan M Q. Calculations of the faraday rotation in re-substituted iron garnets [J]. J Appl Phys, 1993, 73(10): 6133-6135.

[8] Zhang G Y, Xu Y, Yang J H. The influence of admixing of different multiplets on the magnetic moment and faraday effect of rare earth ions in garnets [J]. Acta Phys Sin, 1994, 3(8): 608-616.

[9] Xu Y, Yang Jie Hui, Zhang X J. Quantum theory of the strong magneto-optical effect of ce-substituted yttrium iron garnet [J]. Phys Rev B, 1994, 50(18): 13428-13434.

[10] Jiang S T, Li W. Condensed Matter Magnetic Physics [M]. Beijing: Science Press, 2003. (in Chinese)
姜寿亭,李　卫. 凝聚态磁性物理 [M]. 北京:科学出版社,2003.

[11] Patton C E. Effective linewidth due to porosity and anisotropy in polycrystalline yittrium iron garnet and Ca-V-substituted yittrium iron garnet at 10 GHz [J]. Phys Rev, 1969, 179(2): 352-358.

[12] Zhao Y H, Ma X Q, Wang Z J. The effect of damping coefficient on the saturated magnetization field and configuration of domain structures [J]. Journal of Nantong University, 2006, 5(1): 22-24. (in Chinese)
赵迎华,马星桥,王子军. 阻尼系数对 $Gd_{2.34}Tb_{0.66}Fe_5O_{12}$ 饱和磁场和磁畴结构的影响 [J]. 南通大学学报,2006, 5(1): 22-24.

[13] Crossley W A, Copper R W, Page J L, et al. Faraday rotation in rare-earth iron garnets [J]. Phys Rev, 1969, 181(2): 896-904.

[14] Xia W S, Zhang G Y, Wei M, et al. Theoretical calculation on the magneto-optic property of Ce-substituted yttrium iron garnets crystallized at high temperature [J]. Journal of Magnetic Materials and Devices, 2008, 2: 25-27. (in Chinese)
夏往所,张国营,魏　明,等. 高温结晶 Ce:YIG 晶体磁光性能计算 [J]. 磁性材料及器件,2008,2:25-27.

Effect of the Pressure on Iron Magnetic Resonance and Faraday Rotation in Ce:YIG

YANG Dan, ZHANG Guo-Ying, HU Feng, CHEN Hui, HUANG Yi-Jia

(*College of Science, China University of Mining and Technology, Xuzhou* 221008, *China*)

Abstract: The variations of the damping coefficient and molecule field with the pressure are investigated, and the quantitative forms are given in Ce: YIG crystal. The variations of the line width of iron magnetic resonance and the magneto-optic Faraday rotations with the pressure are presented. The calculated results are agreement with the measured values in the pressure range of 1.33-13.30 Pa. The investigation indicates the dependence of the magnetic and magneto-optic properties of Ce:YIG crystal on the pressure. It is important that the pressure should be controlled properly in the preparation of materials.

Key words: Ce:YIG crystal; pressure; damping coefficient; resonance line width; Faraday rotation