

顺磁性铽玻璃法拉第效应温度特性实验研究*

底楠¹ 赵建林^{1,**} 姜亚军¹ 杨德兴¹ 张浩¹
邹快盛² 韩宗虎³ 陈林峰³

(1 西北工业大学理学院光信息科学与技术研究所, 西安 710072)

(2 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710068)

(3 西安飞行自动控制研究所, 西安 710065)

摘要 利用具有温度控制的磁光调制倍频法, 测量了 Tb₂O₃ 顺磁性铽玻璃在 293K~343K 范围内不同温度下的本征旋转和费尔德常量的温度响应特性. 结果表明, 这种铽玻璃具有敏感的温度响应. 以此种玻璃制作各种磁光器件, 特别是在准确度要求很高的零锁区激光陀螺中作为法拉第偏频器件时, 必须进行温度补偿. 最后给出了两种可能的温度补偿方法.

关键词 顺磁性铽玻璃; 法拉第效应; 本征旋转; 费尔德常量; 温度响应特性

中图分类号 O482.5; V241.5 **文献标识码** A

0 引言

在过去的 40 年中, 基于塞纳克效应 (Sagnac effect) 的激光陀螺经历了从大型实验设备到实用化小型精密惯导器件的转变, 尤其是利顿 (Litton) 公司在 20 世纪 90 年代提出的零锁区激光陀螺 (Zero-Lock Laser Gyro, ZLG), 由于其小巧的结构、良好的随机游走及动态范围特性, 被认为是能够满足下一代小型定位跟踪系统的激光陀螺的代表^[1,2]. 这种 ZLG 利用磁光材料的法拉第效应 (Faraday effect) 产生非互易频移来克服激光陀螺中的闭锁现象. 掺铽的顺磁性玻璃由于具有很大的费尔德常量 (Verdet constant) 而受到广泛关注, 但是顺磁性物质敏感的温度特性也给其实际应用带来了限制. 这一问题并不仅仅表现在准确度要求很高的激光陀螺中, 同样也反映在各种磁光器件当中, 但目前关于这方面的文献报道却很少. 因此, 了解顺磁性铽玻璃的温度响应特性, 并采取适当方法进行补偿, 对于顺磁性铽玻璃的具体应用具有很重要的意义.

本文通过实验研究了 Tb₂O₃ 顺磁性铽玻璃在 293K~343K 范围内的本征旋转和费尔德常量的温度响应特性, 结果表明这种铽玻璃具有敏感的温度响应. 因此, 当使用这种玻璃的法拉第效应, 尤其是在准确度要求很高的零锁区激光陀螺中作为法拉第偏频器件时, 必须进行温度补偿. 文中给出了可能的温度补偿方法.

1 理论基础

根据法拉第效应, 当一束线偏振光通过置于磁场中的磁光介质后, 其偏振面的旋转角度 θ 正比于磁感应强度 B 和光在磁光介质中的传播距离 L , 即

$$\theta = VBL \quad (1)$$

式中 V 为费尔德常量, 与光波长有关. 法拉第效应是光与具有磁矩的物质相互作用的产物, 磁光玻璃是具有法拉第效应的玻璃, 分为抗磁性与顺磁性两大类. 顺磁性玻璃中通常掺杂有稀土离子, 这些离子具有不成对的 $4f$ 电子, 因而本身具有固有的永久电子轨道磁矩^[3]. 三价铽离子 Tb^{3+} 的 $4f$ 电子被外层的 $5s$ 和 $5p$ 电子所屏蔽, 配位场对内层 $4f$ 电子的影响很小, 在磁场的作用下, 使电子极易从 $4f^8 \rightarrow 4f^7 5d$ 迁移, 因此掺铽的玻璃会显示出明显的顺磁性特征^[4-6]. 顺磁性转角的大小主要取决于玻璃中网络外体稀土氧化物的浓度^[3], 中国科学院西安光学精密机械研究所制备的 Tb₂O₃ 磁光玻璃的铽掺杂量为摩尔分数 20%, 具有很大的法拉第旋转角, 可以用于制作各种磁光器件.

对于顺磁性物质, 其费尔德常量有较强的温度依赖性, 且温度越低, 费尔德常量越大. 这是因为随着温度的降低, 电子热振动的振幅减小, 对外加磁场引起的磁矩振幅变化的阻碍减小, 从而使玻璃表现出较强的顺磁性^[6,7].

针对顺磁性物质的温度特性, 1934 年, Van Vleck 和 Hebb^[8] 曾基于法拉第旋转的量子力学表达式得到了顺磁性氟化物玻璃的费尔德常量与绝对温度成反比的结论. 1967 年, Daybell^[9] 等得到了在极低的温度下, 铽玻璃的法拉第旋转角将不再满足式(1), 而改为服从下面的关系

*国家自然科学基金、中国航空工业第一集团公司航空科技联合基金(10477016)和西北工业大学研究生创业种子基金(Z200575)资助

** Tel: 029-88495724-801 Email: jlzha@nwpu.edu.cn
收稿日期: 2006-01-12

$$\theta_F = a \tanh \left[\frac{\mu_e B}{kT} \right] + bB \quad (2)$$

式中 a 和 b 均为常量,再次证明了温度对顺磁性物质法拉第效应有强烈的影响. 近些年,刘公强等^[4]根据电子动力学理论,得到了顺磁性介质费尔德常量 V 的表达式为

$$V = V_0(1 + \nu\chi) = \frac{e\mu_0}{mc_0} \left[\frac{b}{\lambda^2} + \frac{c}{\lambda^4} + \dots \right] (1 + \nu\chi) = \frac{e\mu_0}{mc_0} \left[\frac{b}{\lambda^2} + \frac{c}{\lambda^4} + \dots \right] \left[1 + \nu \frac{C}{T - T_p} \right] \quad (3)$$

式中, χ 为磁化率,顺磁性铽玻璃的磁化率 χ 满足居里-外斯定律 (Curie-Weiss law), 即 $\chi = C/(T - T_p)$, 其中 C, T_p 分别为居里常量和顺磁居里温度. ν 为与分子场有关的系数,且分子交换作用有效场 $H_e = \nu M$, M 为磁化强度. e 为电子电量, μ_0 为真空中的磁导率, c_0 为真空中的光速.

2 实验装置

本实验所用的 Tb20 顺磁性铽玻璃由中国科学院西安光学精密机械研究所提供,样品尺寸为 $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$, 通光方向在厚度方向 (2 mm) 上. 法拉第旋转角采用磁光调制倍频法^[10]进行测量,并在最初的倍频法装置中增加了恒温箱以实现温度控制. 测量装置如图 1, 实验原理见参考文献^[10].

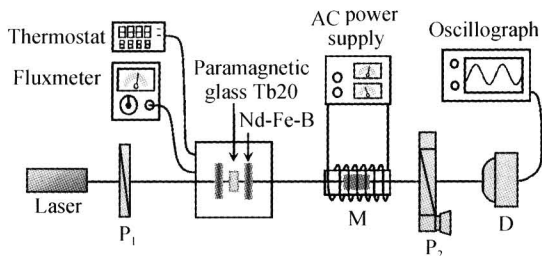


图 1 温度可控的法拉第旋转角测量实验装置
Fig. 1 Experimental setup for measuring the Faraday rotation in different temperatures

由半导体激光器发出的细光束经起偏器 P_1 后成为线偏振光. 铽玻璃样品放置在钕铁硼永磁体产生的轴向磁场中, 当该线偏振光通过样品后, 偏振面发生了旋转, 进而经磁光调制器 M 调制, 并通过检偏角仪 P_2 后由光电二极管 D 接收, 光电流经交流放大器放大后由示波器显示. 当被测样品放入前后, 示波器中两次出现倍频信号时, 测角仪转过的角度就为待测样品的法拉第旋转角 (其中包括本征旋转与磁致旋转的作用量之和). 观察到由钕铁硼产生的磁场会随温度的升高而减弱, 实验中采用特斯拉计对磁场进行实时监测, 测量误差小于 1% .

3 实验结果及分析

实验测量了在未加磁场情况下 Tb20 铽玻璃本征旋转角随温度的变化规律, 通过对不同温度不同磁场下法拉第旋转角的测量, 在扣除了本征旋转的影响后, 得到了该玻璃在 $293\text{K} \sim 343\text{K}$ 范围内的费尔德常量.

3.1 铽玻璃的本征旋转随温度的变化关系

图 2 给出了 Tb20 玻璃在 $293\text{K} \sim 343\text{K}$ 范围内本征旋转角随温度的变化规律. 从图中可以看出, 随着温度的升高, 玻璃的本征旋转角逐渐增大, 在 328K 附近时逐渐趋于稳定.

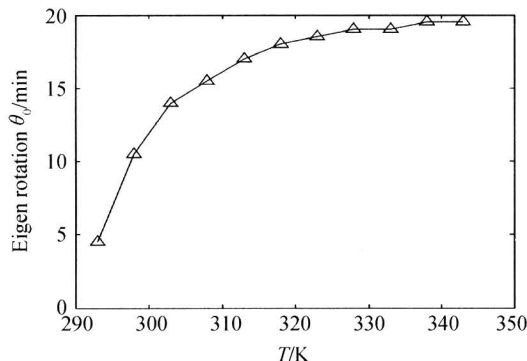


图 2 Tb20 玻璃的本征旋转角随温度的变化关系
Fig. 2 Temperature response of eigen rotation in Tb20 glass

文献^[4]中曾有用介电张量和麦克斯韦方程组描述法拉第效应的宏观理论, 但在整个推导过程中, 并没有涉及到描述外加磁场的量 (B 或 H), 这说明法拉第效应在本质上是与介质的磁化强度 M 相联系的, 而不是直接与外加磁场相联系的^[4]. 因此在顺磁性物质中, 法拉第旋转角 θ 与外加磁场 B 的关系应该为

$$\theta = (\theta_{F0} + VB)L \quad (6)$$

式中 $\theta_0 = \theta_{F0}L$ 为弱磁性介质的本征旋转角.

在铽玻璃中, 掺杂的三价稀土离子 Tb^{3+} 有自由离子项 7F_6 ^[11], 具有固有的永久电子轨道磁矩, 本征旋转由其固有磁矩产生. 同时对于顺磁性物质而言, 当 $T > T_p$ 时, 热运动能会大于甚至远大于交换作用能, 这将导致电子基态能级的分裂, 分裂后的两个或两个以上的基态能级上存在着一定的电子概率分布. 当两个基态能级的电子分布不等时, 对应于右旋和左旋圆偏振光的两种电子跃迁将产生本征旋转^[4], 因此本征旋转与温度有关.

此外, 根据菲涅尔对旋光效应的宏观解释^[12], 转角 θ_0 是由于介质对右旋和左旋圆偏振光的折射率不同而产生的, 即 $\theta_0 = (n_R - n_L)\pi d/\lambda$, 则如果温度对铽玻璃的右旋圆偏振光的折射率 n_R 和左旋圆

偏振光的折射率 n_L 作用程度不同的话, 就将导致 Tb20 玻璃的本征旋转会出现如图 2 的随温度变化的特性.

3.2 铽玻璃的费尔德常量随温度的变化关系

实验中测量了 293K~343K 范围内 Tb20 玻璃的法拉第旋转角, 图 3 给出了 293K、313K 和 333K 时的测量值及拟合后的结果, 其中转角测量值已扣除了本征旋转的影响, 完全由外加磁场所引起. 从图中可以看出, 在每一个特定的温度下, 转角 θ 与磁感应强度 B 都满足 $\theta = VBL$ 的线性关系, 拟合后直线的斜率即反映了费尔德常量 V 的大小.

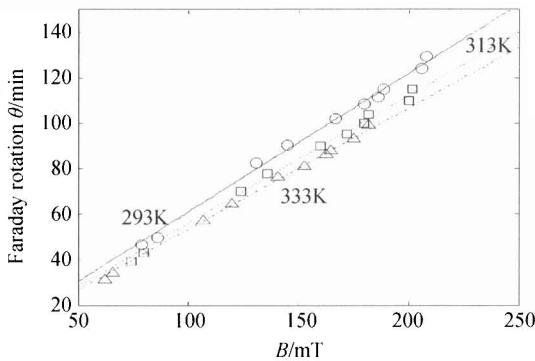


图 3 不同温度下的法拉第旋转测量值及拟合结果
Fig. 3 Faraday rotations and fit results in different temperatures

对各个温度下的测量值进行线性拟合即可得到不同温度下的费尔德常量 V , 其随温度的变化关系如图 4. 从图中可以看出, 费尔德常量随温度的升高而下降, 且变化规律稳定. 根据式(3), 用 $V = k[1 + b/(T - a)]$ 的模型对实验结果进行了拟合, 得到各个参量分别为 $k = 2.22$, $a = 245.4$, $b = 17.6$, 拟合结果如图 4 中的实线. 从拟合结果可以看出, 实验测量值与式(3)的模型吻合得很好. 由此可以得到 Tb20 玻璃的顺磁居里温度 T_p 约为 245.4K, 因此可以预见, 在 245.4K 左右时这种玻璃会发生某种相变, 而这个温度正好在激光陀螺的工作温度以内, 这对于其在法拉第偏频器中的应用是不利的. 同时

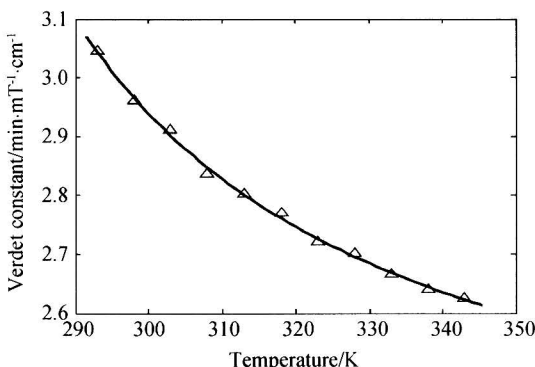


图 4 Tb20 玻璃的费尔德常量随温度的变化关系
Fig. 4 Temperature response of Verdet constant in Tb20 glass

可以看出, Tb20 玻璃的费尔德常量温度响应明显, 费尔德常量在 343K 时比 293K 时减小了 25%, 如此大的变化在 ZLG 偏频系统中是不能忽略的, 必须要加以补偿.

4 温度补偿方法探讨

法拉第效应的温度补偿一般可以分为两类. 一类为数值补偿, 即事先得到法拉第元件在各个温度的变化情况, 然后再对实验结果进行数值修正; 另一类为物理补偿, 即在光路中添加与某一种磁光材料具有相反温度特性的另一种磁光材料, 达到补偿输出的目的. 第二类补偿方法的典型应用实例有, 在一个磁光传感器光路中同时放入适当厚度的石英晶体和 BSO 或 BGO 晶体, 则可以实现 0°C~100°C 范围内得到温度稳定性小于 $\pm 0.2\%$ 的稳定输出^[15]. 究竟采用何种温度补偿方法要根据具体的实验装置和实验要求来确定.

5 结论

本文在理论分析的基础上, 经过不同温度、不同磁感应强度下的多次实验, 得到了 Tb20 顺磁性铽玻璃在 293K~343K 范围内的本征旋转和费尔德常量随温度的变化规律. 实验结果证明了顺磁性磁光玻璃不仅具有很大的费尔德常量值, 而且具有明显的温度依赖性. 因此当其具体应用时, 尤其是作为准确度要求很高的法拉第偏频器件时, 对于其敏感的温度特性必须设法加以补偿^[13,14]. 关于温度补偿的相关内容将另文讨论.

参考文献

- 1 Martin G J, Gillespie S C, Volk C H. The Litton 11cm triaxial Zero-Lock Gyro. IEEE 1996 Position Location and Navigation Symposium, 22-26 Apr. 1996, Atlanta GA USA. 49~55
- 2 Chow W W, Gea-Banacloche J, Pedrotti L M, et al. The ring laser gyro. *Reviews of Modern Physics*, 1985, **57** (1): 61~104
- 3 曹志峰. 特种光学玻璃. 北京: 兵器工业出版社, 1993. 186~188
Cao Z F. Special Optical Glass. Beijing: Ordnance Industry Press, 1993. 186~188
- 4 刘公强, 乐志强, 沈德芳. 磁光学. 上海: 上海科学技术出版社, 2001. 11, 31, 44
Liu G Q, Le Z Q, Shen D F. Magneto-Optics. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 2001. 11, 31, 44
- 5 Sato K, Yamaguchi K, Maruyama F, et al. Anomalous magnetic properties of heavily Tb-doped glasses. *Physical Review B*, 2001, **63**(10): 104416-1~104416-6

- 6 徐时清,杨中民,戴世勋,等. Tb^{3+} 掺杂 Faraday 磁光玻璃的研究进展. 硅酸盐学报, 2003, **31**(4):376~381
Xu S Q, Yang Z M, Dai S X, *et al.* *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2003, **31**(4):376~381
- 7 廖延彪. 偏振光学. 北京:科学出版社, 2003. 133~135
Liao Y B. *Polarized optics*. Beijing: Science Press, 2003. 133~135
- 8 Van Vleck J H, Hebb M H. On the paramagnetic rotation of tysonite. *Physical Review*, 1934, **46**(1):17~32
- 9 Daybell M, Overton W C, Laquer H L, *et al.* The Faraday effect at low temperatures in terbium alumina silicate glass. *Applied Physics Letters*, 1967, **11**(3):79~81
- 10 刘公强, 刘湘林. 磁光调制和法拉第旋转测量. 光学学报, 1984, **4**(7):588~591
Liu G Q, Liu X L. *Acta Optica Sinica*, 1984, **4**(7):588~591
- 11 祁学孟, 盛根强, 张邦录, 等. 高 Verdet 常量的 Tb^{3+} 铝硼硅酸盐玻璃. 光子学报, 1993, **22**(1):85~90
Qi X M, Sheng G Q, Zhang B L, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 1993, **22**(1):85~90
- 12 赵凯华, 钟锡华. 光学(下). 北京:北京大学出版社, 1984. 217~220
Zhao K H, Zhong X H. *Optics (II)*. Beijing: Peking University Press, 1984. 217~220
- 13 郑宏志, 马彩文, 吴易明, 等. 无机械连接方位角测量系统中磁光调制的温度适应性研究. 光子学报, 2004, **33**(5):638~640
Zheng H Z, Ma C W, Wu Y M, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(5):638~640
- 14 姜海丽, 王政平, 李庆波, 等. 保偏反射膜温度特性对 BGOCT 灵敏度影响的理论研究. 光子学报, 2004, **33**(12):1453~1455
Jiang H L, Wang Z P, Li Q B, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(12):1453~1455
- 15 Mitsui T, Tada K, Kuhara Y, *et al.* Magneto-optical converter utilizing Faraday effect. U. S. Patent 4, 560, 932. Dec. 24 1985

Experiment Research on Temperature Response of Faraday Effect in Paramagnetic Terbium Glass

Di Nan¹, Zhao Jianlin¹, Jiang Yajun¹, Yang Dexing¹, Zhang Hao¹,
Zou Kuaisheng², Han Zonghu³, Chen Linfeng³

¹ Institute of Optical Information Science and Technology, School of Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072

² Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, Xi'an 710068

³ Xi'an Flight Automatic Control Research Institute, Xi'an 710065

Received date: 2006-01-12

Abstract A magneto-optical-modulating-double-frequency system is set up and actualized with temperature controlled added. The eigen rotation and Verdet constant of the paramagnetic terbium glass Tb₂₀ are measured in 293K~343K. With the temperature goes higher, the eigen rotation increases to a stable value gradually and the Verdet constant decreases keeping to the theoretical formula. The experimental results show that the terbium glass has sensitive temperature response. When it is used, especially used as Zero-Lock gyro Faraday bias element, temperature compensation must be taken, and several potential approaches to temperature compensation are also given.

Keywords Paramagnetic terbium glass; Faraday effect; Eigen rotation; Verdet constant; Temperature response



Di Nan was born in Shijiazhuang, Hebei province in 1981. He is pursuing his Doctor degree in Institute of Optical Information Science and Technology, School of Science, Northwestern Polytechnical University. His main research is on magneto-optics.