

激光陀螺中应用的石榴石 单晶薄膜磁光材料

刘湘林 王洪祥

(中国科学院上海冶金研究所)

提要: 概述了石榴石单晶薄膜磁光材料在激光陀螺中的应用, 石榴石磁镜偏频的特性及其与金属磁镜的比较。报导了 $(\text{BiPrGdYb})_3(\text{FeAl})_5\text{O}_{12}$ 单晶薄膜的生长工艺、磁光性能和石榴石磁镜偏频激光陀螺的试验结果。

Magneto-optic materials of garnet single crystal films for ring laser gyroscopes

Liu Xiangling, Wang Hongxiang

(Shanghai Institute of Metallurgy, Academia Sinica)

Abstract: Application of magneto-optic materials of garnet single crystal films in ring laser gyroscopes, bias frequency properties of the garnet magnetic mirror and comparison of the garnet magnetic mirror with the metal magnetic mirror are summarized. Growth technology and magneto-optic properties of single crystal films of $(\text{BiPrGdYb})_3(\text{FeAl})_5\text{O}_{12}$, and experimental results in a ring laser gyroscope of bias frequency of the garnet magnetic mirror are reported.

引言

1969年 Hetherington 等^[1]预言, 在环形激光器中, 用石榴石磁光晶体做成的 Faraday 偏频元件比半导体材料的 Faraday 元件性能更好。1977年 Henry 等^[2]用石榴石单晶薄膜制成四层结构的 Faraday 元件, 使 1.152 微米波长的 He-Ne 激光陀螺得到相当于 350 度/秒旋转速率的偏频量, 总插入损耗小于 1%, 其中石榴石元件的插入损耗只有 0.5%^[3]。

1975年 McClure^[4]透露, 可用石榴石膜代替金属磁膜作 Kerr 偏频“磁镜”。1977年 Klass^[5]声称 Sperry 等公司正在研究用磁性石榴石晶体来减小激光陀螺的光路损耗。1978年 McClure 及 Vaheer^[6]采用石榴石磁镜(简称“GMM”), 在 1.15 微米波长下获得了满意的磁镜磁光优值 ($\Delta\phi/L_0$, $\Delta\phi$ ——相移, L_0 ——光损耗)和开关特性。最近, Krebs 等^[7]的总结肯定了 GMM 在激光陀螺应用中的显著优点。

我们于 1979 年开始研制 GMM 材料, 用

收稿日期: 1982 年 10 月 13 日。

等温浸渍液相外延在 (111)Gd₃Ga₅O₁₂ 衬底上生长了 (BiPrGdYb)₃(FeAl)₅O₁₂ 单晶薄膜,在波长 $\lambda=0.6328$ 微米下,典型样品的磁光优值 θ_F/α (θ_F ——比 Faraday 旋转, α ——光吸收系数)为 3.69~4.05 度/分贝。清华大学将这种单晶薄膜用于激光陀螺试验,已观察到拍频讯号。

GMM 的特性

“磁镜”偏频技术简单而巧妙地克服了激光陀螺的“闭锁”问题^[4,8]。这种磁镜偏频元件由磁光薄膜及高反射率多层介电薄膜(简称“MLD”)构成。前者利用横向 Kerr 磁光效应使相反方向入射的光束产生非互易的相移而达到偏频效果;后者用来提高反射率(使 $R \geq 95\%$)。当磁镜的磁化方向平行于磁镜平面而垂直于激光环行的平面,且平行于环行面的线偏振光(P光)被磁化的磁镜反射时,则两束相反方向环行的激光将产生非互易相移,但不改变其线偏振特性^[9,10]。

对磁镜首先要求有高的偏频值 $\Delta\nu_b$ ($\propto \Delta\phi$)及低的光损耗 L_0 ,因而 $\Delta\phi/L_0$ 是衡量磁镜优劣的主要参数;其次要在低磁场下有好的镜面磁化易开关特性;第三应有尽可能小的随机漂移。与金属磁镜(简称“MMM”)相比,GMM 最突出的优点是反射损耗很小,它的磁光优值 $\Delta\phi/L_0$ 比 MMM 的大许多倍^[7]。GMM 的开关性能是理想的,开关时间短、可重复、无可测的抖动,甚至可在 1 奥斯特场强以下进行开关。当然为了确保磁化的饱和,一般需加较大的磁场。GMM 的磁饱和场强大约是 MMM 的 1/3,故磁化功率可减小 80%,从而减小了它对多轴组合中其它激光环的杂散场影响。GMM 上述优点对激光陀螺的小型化也相当有利。GMM 的镜面易磁化性可通过选择适当的衬底材料、配料成分及生长工艺来达到。GMM 的随机漂移也比 MMM 的小,前者为 0.019 度/小时,后者为

0.046 度/小时,因此采用 GMM 将使激光陀螺在导弹、飞机导航及制导中的应用大为有利^[6]。

(BiPrGdYb)₃(FeAl)₅O₁₂ 单晶薄膜

磁光器件要求石榴石材料具有大的比 Faraday 旋转 θ_F 、小的光吸收系数 α 和低的饱和磁化强度 $4\pi M_s$ ^[11]。(BiPrGdYb)₃(FeAl)₅O₁₂ 单晶薄膜具有良好的磁光性能,因此是集成光路调制^[12]及激光陀螺磁镜偏频^[7]中适用的磁光材料。

我们用等温浸渍液相外延法,在 (111)Gd₃Ga₅O₁₂ 衬底上生长出厚度为 0.3~30 微米的 (BiPrGdYb)₃(FeAl)₅O₁₂ 单晶薄膜。生长温度 $T_G=780\sim 840^\circ\text{C}$,生长时间 $\tau=5\sim 30$ 分,衬底转速 $\omega=50\sim 400$ 转/分;在这些生长条件下,生长速率 G 为 0.05~2.60 微米/分。调节熔料成分、 T_G 、 τ 和 ω 可控制膜的磁光性能。这种薄膜的 $4\pi M_s=200\sim 300$ 高斯, $\lambda=1.15$ 微米时,膜的折射率 $n \approx 2.27$, $\theta_F=760\sim 1150$ 度/厘米, $\alpha < 10$ 厘米⁻¹, $\lambda=0.6328$ 微米时, $n \approx 2.34$, $\theta_F=6170\sim 9320$ 度/厘米, $\alpha=529\sim 807$ 厘米⁻¹, $\theta_F/\alpha=2.18\sim 4.05$ 度/分贝。

采用不同的熔料成分和 T_G 进行外延,可以得到易磁化方向及畴结构不同的单晶薄膜。例如,退磁状态下,在偏光显微镜中可观察到迷宫畴(图 1),其易磁化方向垂直于膜面;平行条畴(图 2),其易磁化方向稍偏离膜面;无畴,其易磁化方向位于膜面。

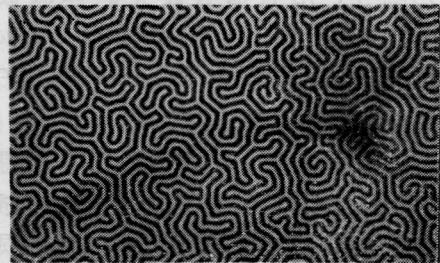


图 1 迷宫畴

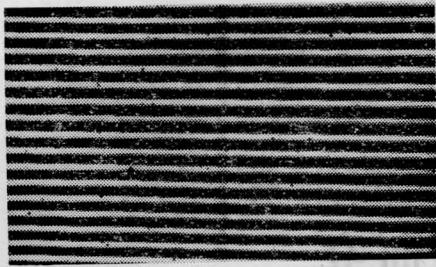


图2 平行条畴

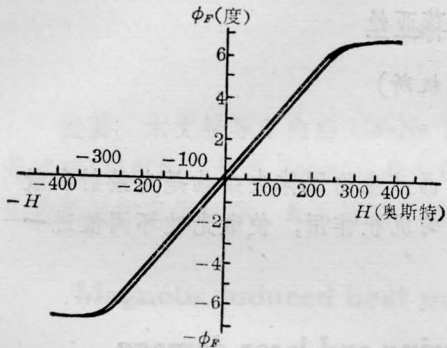


图3 膜的 Faraday 旋转 ϕ_F 与 H 的关系
($\lambda=0.6328$ 微米)

在 $\lambda=0.6328$ 微米时, 测定了薄膜的 Faraday 旋转 ϕ_F 与磁场 H 的关系(磁滞回线), 其结果见图 3。由图 3 得出矫顽力 $H_c \approx 3$ 奥斯特, 饱和磁场 $H_s \approx 320$ 奥斯特, 回线呈细长形, 在 $H < 250$ 奥斯特时有直线关系。此特性对交变的磁光调制非常有利。

激光陀螺初试结果

清华大学将 $(\text{BiPrGdYb})_3(\text{FeAl})_5\text{O}_{13}$ 单晶薄膜用于腔长 60 厘米, 波长 1.15 微米的激光陀螺系统中, 其光路见图 4。在 ~ 100

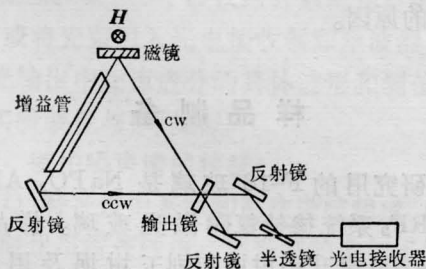


图4 磁镜偏频激光陀螺光路简图

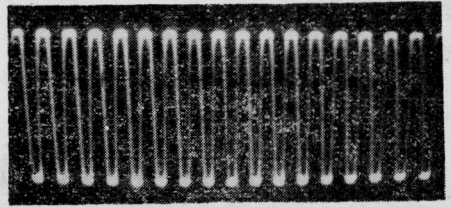


图5 直流磁场下的拍频信号

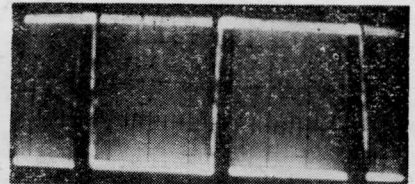


图6 交流磁场下的拍频信号

奥斯特的直流磁场下观察到 13 千赫的拍频信号(图 5)。在 50 赫的交流磁场下观察到交变的拍频信号(图 6)。图中, 交流磁场每周 (0.02 秒) 中有两次为 0, 这对应于拍频的锁区。由此可见, 已实现了磁镜偏频激光陀螺的原理试验。

对清华大学提供激光陀螺试验结果及我所 GGG 单晶组提供衬底表示感谢。

参 考 文 献

- [1] A. Hethering *et al.*; *Infrared Phys.*, 1969, **9**, No. 3, 109.
- [2] R. D. Henry *et al.*; Ninth Annual Electro-Optic and Laser Conf., Anaheim CA, 1977, October.
- [3] F. C. Whitcomb, R. D. Henry; *J. Appl. Phys.*, 1978, **49**, No. 3, 1803.
- [4] R. E. McClure; U. S. Pat., 1975, NO. 3927946.
- [5] P. J. Klass; *Aviat. Week Space Tech.* 1977, **107**, No. 4, 44.
- [6] R. E. McClure, E. Vaher; Proc. of IEEE Nat. Aerospace Electronics Conf., New York, 1978, 544.
- [7] J. J. Krebs *et al.*; *IEEE Trans. on Mag.*, 1980, **MAG-16**, No. 5, 1179
- [8] R. F. Morrison *et al.*; Proc. of IEEE Nat. Aerospace Electronics Conf., New York, 1977, 1045.
- [9] W. M. Macek; *Brit. Pat.*, 1975, No. 1406730.
- [10] R. E. McClure; *IEEE Trans. on Mag.*, 1980, **MAG-16**, No. 5, 1185.
- [11] V. B. Kravtchenko *et al.*; *Mat. Res. Bull.*, 1979, **14**, No. 4, 559.