

YbBi:YIG 磁光电流传感器性能研究*

赵渭忠

(浙江大学物理系和硅材料国家重点实验室, 浙江, 杭州, 310027)

摘要 采用高温助熔剂熔盐生长出了复合掺杂 YbBi:YIG 磁光石榴石单晶, 并应用于磁光光纤电流传感器研制. 此单晶的比法拉第旋转角为 -404deg/cm , 磁光优值为 25.8deg/dB , 饱和磁化场为 1400Oe , 温度系数为 $4.2 \times 10^{-4}\text{K}^{-1}$ (室温, $\lambda=1.55\mu\text{m}$). 与纯 YIG 相比具有较好的磁光性能, 有更高的比法拉第旋转角和磁光优值以及较小的温度依赖性. 用此单晶作为法拉第转子材料, 建立了单光路结构的磁光光纤电流传感器的实验原型, 测试了它在测量 50Hz 交变电流时的性能, 测试结果表明传感系统具有较高的精度和灵敏度并有较好的线性关系.

关键词 磁光晶体, 法拉第旋转, 光纤传感器, 电流传感器.

MAGNETO-OPTIC CURRENT SENSORS BASED ON YbBi:YIG*

ZHAO Wei-Zhong

(Department of Physics and State Key Laboratory of Silicon Materials, Zhejiang University,
Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract A co-doped Bi-substituted rare earth iron garnet single crystal YbBi:YIG was grown from high temperature solution, and was used first time for magneto-optic optical fiber current sensors. The crystal has the specific Faraday rotation angle -404deg/cm , magneto-optic figure of merit 25.8deg/dB , saturation magnetic field 1400Oe , and temperature coefficient $4.2 \times 10^{-4}\text{K}^{-1}$ (at room temperature, $\lambda=1.55\mu\text{m}$). It has larger Faraday rotation angle and magneto-optic figure of merit and lower temperature sensibility than pure YIG. A laboratory prototype sensor was established using the YbBi:YIG crystal as Faraday rotator element, and its sensing performance was tested under a 50Hz frequency AC. The tested results show that the sensor system has high accuracy, sensitivity and good linearity.

Key words magneto-optic crystal, Faraday rotation, fiber sensors, current sensors.

引言

磁光法拉第光纤电流传感器是利用材料的磁光法拉第旋转效应, 测量电流(磁场)的传感测试系统. 光纤电流传感器具有结构简单、安全可靠、高精度和灵敏度、抗电磁干扰能力强等优点, 是现代电力工业系统中, 用于替代传统电流互感器最有应用前景的高压大电流测量与监控系统^[1], 因而受到了国内外的广泛关注^[2~4].

传感材料的磁光性能对于光纤电流传感器的性能有着重要的影响, 在实际应用中一般要求所用磁光材料有大的法拉第旋转角 θ_F 、良好的温度特性、高的磁光优值以及合适的饱和磁化强度等磁光性

能. YIG 和 GdBiIG 等典型的稀土石榴磁光晶体, 它具有较大的法拉第旋转角(θ_F)时对温度的依赖性相对较大, 而它具有较小 θ_F 时, 对温度依赖较小, 但它们都不能很好地满足低温度灵敏度的光纤电流传感器的应用要求. 为得到具有低温度灵敏度的大法拉第旋转的磁光材料, 一种可行的方法是将两种具有不同符号温度依赖性的稀土替代铁石榴石进行复合, 以相互抵消各自的温度系数, 从而得到法拉第旋转温度稳定的磁光材料.

本文用高温助熔剂熔盐法生长了复合掺杂的 Bi 替代稀土石榴石磁光单晶 YbBi:YIG, 研究了它在 $0.8 \sim 1.7\mu\text{m}$ 近红外波段的法拉第旋转角 θ_F 及其温度特性、光吸收系数、磁光优值等参数的磁光性

* 国家自然科学基金(编号: 69890230)资助项目
稿件收到日期 2000-12-09, 修改稿收到日期 2001-02-22

* The project supported by the National Natural Science Foundation of China(No. 69890230)
Received 2000-12-09, revised 2001-02-22

能,并首次采用 YbBi:YIG 单晶作为法拉第转子材料,建立了块状晶体单光路结构磁光光纤电流传感器系统实验原型,对其传感性能进行了实验研究。

1 法拉第材料制备

1.1 法拉第旋转温度依赖性

法拉第旋转角的温度依赖性与磁光材料内禀磁性能有关,起源于材料饱和磁化强度的温度依赖性。对亚铁磁体石榴石晶体,晶体净饱和磁化强度为 4 面体位、8 面体位和 12 面体位各次晶格饱和磁化强度之和^[5]。

$$M_s(T) = |M_d(T) - M_8(T) - M_{12}(T)|, \quad (1)$$

式(1)中 $d, 8, 12$ 分别代表晶体的 4 面体位、8 面体位和 12 面体位次晶格。

根据 Crossly 模型, $\theta_F(T)$ 的值与各次晶格的磁化强度的关系为^[6]

$$\theta_F(T) = AM_d(T) + DM_8(T) + CM_{12}(T), \quad (2)$$

式(2)中 A, D, C 是各次晶格的磁光系数,这些磁光系数包含电偶极子与磁偶极子两种跃迁的贡献:

$$\begin{aligned} D &= D_e + D_m, \\ A &= -A_e - A_m, \\ C &= -C_e - C_m; \end{aligned} \quad (3)$$

式(3)中 A, D, C 是电偶极子跃迁, A_m, D_m, C_m 是磁偶极子跃迁系数。

显然可以通过改变各次晶格饱和磁化强度(M_d, M_8, M_{12})的贡献或者改变替代离子的种类与数量,即改变晶体的磁光系数(A, C, D)来控制材料法拉第旋转角对温度的依赖性。人们对各种稀土铁石榴石研究发现,一些稀土离子铁石榴石,如 $\text{Yb}_2\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 和 $\text{Gd}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 等,其 θ_F 具有正的温度依赖关系;而另一些稀土离子铁石榴石,如 $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 和 $\text{Ho}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 等,则具有负的温度依赖关系。若将具有相反温度依赖性的稀土铁石榴石复合,通过不同符



图 1 晶体的外观形貌

Fig. 1 Photograph of YbBi:YIG crystal

号温度依赖关系离子的补偿效应,可预期生长出法拉第旋转角随温度变化较小的晶体。根据 Bi^{3+} 的掺入能大大提高稀土石榴石晶体的法拉第旋转角,及 $\text{Yb}_2\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 和 $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 对法拉第旋转角具有相反温度依赖性,选择生长 YbBi:YIG 单晶用于法拉第磁光光纤电流传感器的法拉角转子材料。

1.2 单晶生长

采用高温助熔剂熔盐法生长 YbBi:YIG 磁光石榴石单晶,以 $(\text{PbO} + \text{PbF}_2)$ 系为助熔剂,按 $\text{Y}_2\text{O}_3 : \text{Yb}_2\text{O}_3 : \text{Bi}_2\text{O}_3 : \text{Fe}_2\text{O}_3 : (\text{PbO} + \text{PbF}_2 + \text{CaCO}_3)$ 为 7.64 : 1.04 : 1.74 : 20.78 : 88.8 的配方配料 250g,原料经充分研磨混合后置于铂坩埚内,在单晶炉中加热到 1250℃ 的高温,并在此温度上保温 10h 以上,熔料经过充分溶解、混合后,以 0.8~3℃/h 的冷却速率缓慢降温至约 980℃,然后自然冷却到室温,在此过程中,熔融物在过饱和状态下缓慢结晶,最后形成块状单晶体。

用熔盐法成功地生长了 YbBi:YIG 单晶,单晶外观品质较好,并具有金属光泽,部分晶体的外观形貌如图 1 所示,图 1 中最大晶体尺寸达 $22 \times 15 \times 12\text{mm}$,所长晶体经粉末 X 射线衍射测量后确定为石榴石相单晶,经 EPMA 扫描电镜能谱分析得到单晶的分子式成份为 $\text{Y}_{2.159}\text{Yb}_{0.246}\text{Bi}_{0.165}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$,其尺寸和光学质量可以满足制作光纤电流传感器等一些磁光器件对晶体材料的要求。

2 磁光性能测试与分析

生长的 YbBi:YIG 单晶经 X 射线定向,沿 $[111]$ 面切割,磨、抛成约 $200\mu\text{m}$ 厚的薄片,用 CGX-1FR 测量装置测量了晶体 0.8~1.7 μm 范围内法拉第旋转谱,同时用该装置测量了晶体的吸收光谱,测

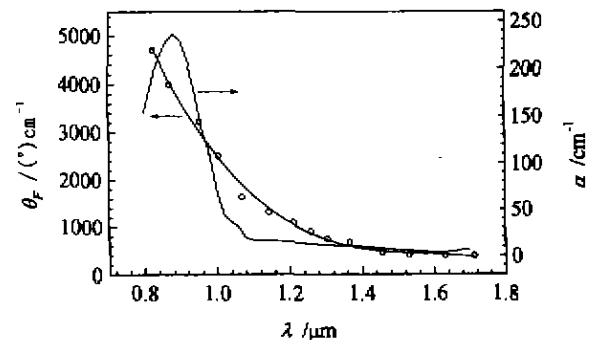


图 2 YbBi:YIG 的比法拉第旋转角和光吸收系数

Fig. 2 Specific Faraday rotation and absorption of YbBi:YIG

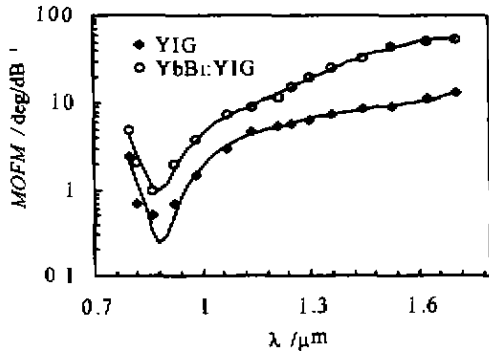


图3 YIG、YbBi:YIG 的磁光优值
Fig. 3 Magneto-optic figure of merit of YIG and YbBi:YIG

试结果如图 2 所示. 在室温饱和和磁化的情况下, YbBi:YIG 单晶的比法拉第旋转为 -404deg/cm ($\lambda = 1.55 \mu\text{m}$), 约为 YIG 晶体的 2 倍, 而光吸收系数约为 3.6cm^{-1} , 与 YIG 的吸收系数相近. 磁光晶体的法拉第旋转角与光吸收损耗之比, 即磁光优值 (Magneto-optic figure of merit, MOFM), 更能反映材料的磁光性能之优劣. 根据法拉第旋转角与光吸收系数求得 YbBi:YIG 在 $0.8 \sim 1.7 \mu\text{m}$ 的磁光优值 (见图 3), 图 3 中还给出 YIG 的磁光优值以作比较, YbBi:YIG 的磁光优值为 25.8deg/dB ($\lambda = 1.55 \mu\text{m}$), 比 YIG 提高. 另外, 还用该装置测量 YbBi:YIG 的饱和磁化场为 1400Oe .

通过在测试样品架上加一可变温装置, 测量了 YbBi:YIG 晶体 $300 \sim 400 \text{K}$ 法拉第旋转角随温度变化关系, 结果如图 4 所示, 定义法拉第旋转角温度系数^[7]为

$$S = \frac{1}{\theta_F} \frac{d\theta_F}{dT} \quad (4)$$

求得 YbBi:YIG 的温度系数为 $4.2 \times 10^{-4} \text{K}^{-1}$ (室温, $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$), 它与 YIG 晶体相比有所减小.

表 1 给出了几种常见稀土石榴石晶体的磁光性能.

表 1 几种常见稀土石榴石晶体的磁光性能 ($\lambda = 1.55 \mu\text{m}$)
Table 1 Magneto-optic properties of some rear-earth iron garnets ($\lambda = 1.55 \mu\text{m}$)

晶 体	$\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$	$\text{Yb}_x\text{Bi}_y\text{Y}_{3-x-y}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ ($x = 1.03, y = 1.12$)
比法拉第旋转角 (deg/cm)	216	404
光吸收系数 (cm^{-1})	5.48	3.6
磁光优值 (deg/dB)	9.1	25.8
法拉第旋转角温度系数 (K^{-1})	6.60×10^{-4}	1.20×10^{-4}
饱和磁场 (Oe)	1800	1400

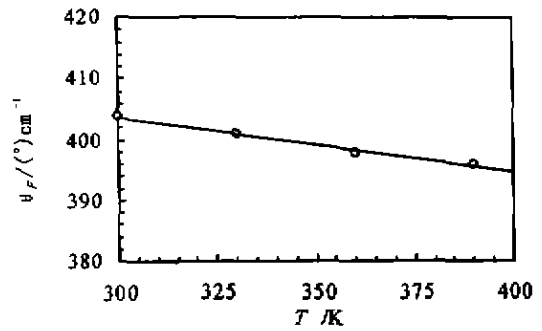


图 4 YbBi:YIG 法拉第旋转角的温度依赖性
Fig. 4 Temperature dependence of Faraday rotation of YbBi:YIG

YbBi:YIG 晶体与纯 YIG 等稀土石榴石晶体相比, 有更大的法拉第旋转角、更大的磁光优值和较小的温度依赖性, 以及合适的饱和磁化强度, 因此选用 YbBi:YIG 晶体作为法拉第转子材料进行光纤电流传感器性能研究, 可望取得较好的结果.

对于法拉第电流传感器, 其灵敏度与在外加磁场 H 下产生的法拉第旋转角 θ_F 有关^[8],

$$S = d\theta_F/dH = \theta_F''/H_{sat} \quad (5)$$

$$H_{sat} = N_D M_{sat} \quad (6)$$

式(6)中 N_D 是退磁因子, M_{sat} 是材料的饱和磁化强度. 从式(5)可以看出, 磁光材料的饱和磁化强度越小, 其传感器灵敏度越高. YbBi:YIG 的饱和磁化强度比 YIG 略小, 因而灵敏度也比 YIG 晶体要高, 用它作为法拉第传感材料的光纤电流传感器可以获得更高的精度和分辨率.

3 传感系统性能测试

磁光光纤电流传感器是通过测量在外磁场的作用下所产生的法拉第旋转角 θ_F 来测量被测电流大小的. 为了能测量 θ_F 的大小, 提出了许多不同的测试结构, 其中主要的有: 单光路结构、双光路求积结构和相位检测结构. 这里采用其中最简单的单光路结构, 测试研究 YbBi:YIG 晶体作为磁光光纤电流传感器法拉第转子材料的传感性能表现. 系统结构框图如图 5 所示, 图 5 中两偏振片的透光主轴之间的夹角为 45° , 此时入射光经过传感头后的出射光强为:

$$I = \frac{I_0}{2} (1 + \sin 2\theta_F) \quad (7)$$

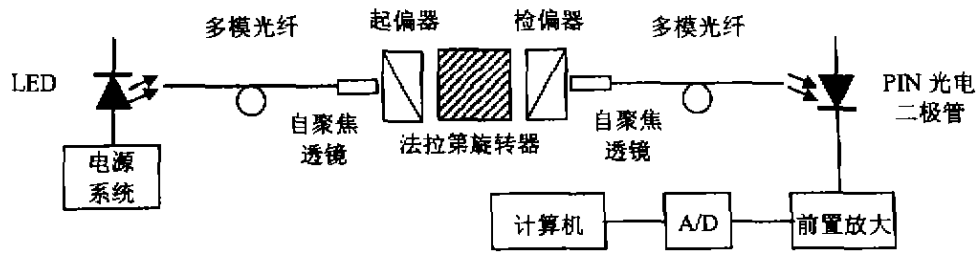


图 5 系统结构框图

Fig. 5 Schematic diagram of system set up

式(7)中 I_0 是入射光强,这里忽略了吸收、散射等损耗。

从式(7)可知,其输出信号与入射光强有关,光源入射光强的波动会给测试带来一定的误差。为消除光源波动的影响,可将输出信号 I 分解为直流 I_D 、交流 I_A 两个分量,即:

$$I_D = \frac{I_0}{2}, \quad (8)$$

$$I_A = \frac{I_0}{2} \sin 2\theta_F. \quad (9)$$

其比值为

$$P = \frac{I_A \sin 2\theta_F}{I_D} \approx 2\theta_F \propto H(I), \quad (\theta_F \ll 1^\circ) \quad (10)$$

它为一与光源光强无关的量,因而可以通过测量与光源光强无关的量 P ,进而测得电流的大小。

选择生长质量较好、尺寸较大的 YbBi:YIG 单晶,沿[111]面定向切割成 $\varphi 5 \times 1.1\text{mm}$ 的薄片体,并对圆片端面进行打磨、抛光,以减少端面的吸收、散射等损耗。将此加工好的单晶作为法拉第转子材料。系统光源采用 $\lambda = 1.530\mu\text{m}$,输出功率为 $45.7\mu\text{W}$ (150mA)的 LED,光电二极管为带前置放大的宽动态范围 PIN 光接收组件 PFWM92,其探测灵敏度为 0.97A/W ($\lambda = 1.55\mu\text{m}$)。传感器输出光信号通过 PIN 组件进行光电转换,经电路放大至 12 位 AD 进行 AD 转换,由计算机进行数据采集与处理,得出输出信号。

实验所需的大电流由 $n \approx 3000/\text{m}$, $L = 500\text{mm}$, $R = 100\text{mm}$ 的长直螺线管模拟提供。螺线管轴线中心的磁场强度为(以直流电流为例):

$$H = nI \frac{L}{\sqrt{4R^2 + L^2}} \approx nI, \quad (11)$$

而对于长直导线,其绕导线一周的磁场为:

$$H = \oint H = \oint \frac{1}{4\pi} \frac{2I}{r_0} = I. \quad (12)$$

比较式(11)和式(12)可知此螺线管电流为 1A 时,其中心磁场大约相当于高压直导线 3000A 电流所产生的磁场。

测试时将传感头置于长直螺线管中心,方向与螺线管中心线平行,此时光在法拉第转子材料中行进的方向与磁场平行。通过改变加于螺线管的电流来改变作用于传感器的磁场,测试传感器输出信号与磁场的关系。给螺线管加 50Hz 交变电流,测量传感系统在交变磁场下的传感性能。

由于实验条件的限制,实验测量的电流范围为 $0.1 \sim 5.0\text{A}$ 。图 6 为输出信号与螺线管电流 I 的关系。从图 6 中可见,输出信号与螺线管电流 I ,即与外加磁场 H 有较好的线性关系。

经实验测定,传感系统实验原型测量灵敏度为 0.0032A/mV (折合长直导线电流所产生的磁场,相应的测量灵敏度为 9.5A/mV)、测量精度约为 $\pm 1\%$,最大线性偏离为 0.9% 。

在此实验原型中,所采用的系统结构及相关的信号采集与处理系统都较简单,但它仍然有较高的精度、灵敏度和较好的线性关系。经过进一步的改进,如采用双光路结构、更精确的数据采集和处理系

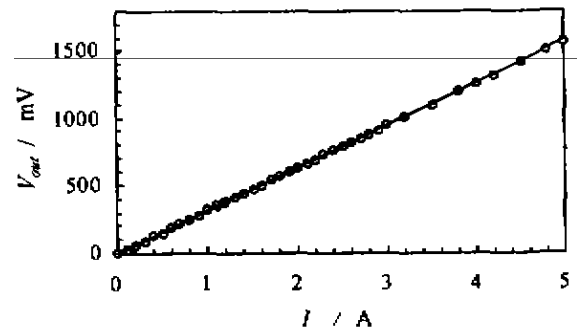


图 6 输出信号与螺线管电流的关系

Fig. 6 Output signal vs applied current

统等方法,其传感性能将有更大的提高.因此采用 YbBi:YIG 等稀土石榴石晶体为法拉第转子材料的磁光光纤电流传感器,具有高灵敏度、高精度和低温度依赖性等特点,可望成为电流传感器的高性能新产品.

4 结语

本文从材料与器件两方面相结合的角度出发,对磁光光纤电流传感器系统进行了实验性研究.根据具有法拉第旋转角随温度变化关系相反的不同稀土石榴石复合的补偿效应,选择生长 YbBi:YIG 晶体用于磁光光纤电流传感器研制.用高温助熔剂熔盐法生长出了分子式成份为 $Y_{2.329}Yb_{0.245}Bi_{0.465}Fe_5O_{12}$ 的 YbBi:YIG 晶体,测试结果显示 YbBi:YIG 晶体比纯 YIG 有更大的比法拉第旋转角、更大的磁光优值和较小的温度依赖性,非常适用于高灵敏度、高精度、低温度依赖的磁光光纤电流传感器等一些磁光器件的应用.以 YbBi:YIG 晶体作法拉第转子材料,建立了一套磁光光纤电流传感器实验原型,在 50Hz 交变电流下,测试了 YbBi:YIG 晶体传感性能,结果显示了该系统具有较高的精度和灵敏度,并有较好的线性关系.

REFERENCES

- [1] Day G W, Rose A H. Faraday effect sensors: the state of the art. *Proc. SPIE*, 1988, **985**: 135—150
- [2] Svantesson K, Sohlstrom H, Holm U. Magneto-optical garnet materials in fibre optic sensors systems for magnetic field sensing. *Proc. SPIE*, 1990, **1274**: 260—269
- [3] Higuchi S, Furukawa Y, Takekawa S, *et al.* Magneto-optical properties of cerium substituted yttrium iron garnet single crystals grown by traveling solvent floating zone method. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1999, **38** (7A): 4122—4126
- [4] Itoh N, Minemoto H, Ishiko D, *et al.* Small optical magnetic-field sensor that uses rare-earth iron garnet films based on the Faraday effect. *Appl. Optics*, 1999, **38** (10): 2047—2052
- [5] Dionne G F. Molecular-field coefficients of substituted YIG. *J. Appl. Phys.*, 1970, **41**: 4874—4881
- [6] Crossley W A, Cooper R W, Page J L, *et al.* Faraday rotation in rare-earth iron garnets. *Phys. Rev.*, 1969, **181**: p896—904
- [7] Zhang S Y, Zhang Z L, Huang M, *et al.* Magneto-optic properties of GdBiIG bulk crystals in near-infrared wavelength range. *Chinese Physics*, 1992, **12**(2): p740—743
- [8] Deeter M N, Rose A H, Day G W. Fast, sensitive magnetic-field sensors based on the faraday effect in YIG. *J. Lightwave Tech.*, 1990, **8**(12): 1838—1842