

# 近红外波段 GdBilG 单晶的磁光性能\*

张守业 张志良 黄敏 郭永健 蔡文永 徐志成

(浙江大学材料科学与工程学系, 浙江, 杭州, 310027)

**摘要:** 用  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  作为助熔剂, 在坩埚可加速旋转的单晶炉内成功地生长出 GdBilG 单晶体. 将单晶体沿 (111) 面切割、磨抛成薄片状样品, 以磁光调制倍频法测得近红外波段 ( $0.9\sim 1.7\mu\text{m}$ ) 磁光旋转谱; 并同其它几种稀土铁石榴石材料相比, 发现 GdBilG 的磁光优值大, 是制作非互易光学器件较为理想的法拉弟旋转介质.

**关键词:** 磁光晶体, Faraday 旋转.

## 引言

在光通信及光测量等技术的发展中, 为保证激光源有高的频率稳定性, 避免反射光束引起的不稳定振荡, 非互易磁光控制器件——隔离器及环流器的使用是不可缺少的<sup>[1]</sup>. 在这些磁光器件中, 最重要的材料是用作法拉弟转子的稀土铁石榴石. 这类材料在近红外光区光吸收系数小, 旋转角大, 磁光优值高, 因而可供制造各种高性能的非互易光学器件.

七十年代初, S. Wittekoek<sup>[2]</sup>和 H. Takeuchi<sup>[3]</sup>等先后发现, 在稀土铁石榴石中以铋离子部分取代稀土离子, 可使晶体的法拉弟旋转角显著增大并改善其磁学性能. 目前, 对法拉弟旋转材料的研究焦点就是掺铋的稀土铁石榴石. 为此, 国外用稀土铁石榴石作为法拉弟转子, 在  $1.31\mu\text{m}$  和  $1.55\mu\text{m}$  两个频段工作的磁光隔离器已有试制产品<sup>[4]</sup>. 本文以助熔剂法研究生长出 GdBilG 块状单晶体, 经磁光测量表明, 其磁光优值在近红外光区远远高于 YIG、Bi-YIG、BiCaVIG 和 BiTmGalG 等磁光晶体.

## 1 铋替代钆铁石榴石单晶生长

为了生长出含铋量高的钆铁石榴石块状单晶体, 我们用以  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  为主要助熔剂的助熔剂方法, 根据  $\text{Gd}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-Bi}_2\text{O}_3$  的三元系相图<sup>[5]</sup>, 按生长 GdBilG 晶体的三元系成份配比为  $\text{Gd}_2\text{O}_3 < 8\text{mol.}\%$ ;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  30~53mol.%;  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  40~60mol.%, 定出各氧化物熔料的总重量为 270g, 经仔细研磨混合后, 盛于铂坩埚内, 在可使坩埚正反向加速旋转的单晶炉中, 加热至  $1280^\circ\text{C}$ , 经适当保温后, 使坩埚加速旋转, 并以  $1\sim 5^\circ\text{C/h}$  速率缓慢降温至  $980^\circ\text{C}$ , 再经自然冷却至室温. 以稀硝酸使单晶体与残渣分离. 为了有利于晶体生

本文 1990 年 11 月 13 日收到, 修改稿 1991 年 5 月 6 日收到.

\* 国家自然科学基金资助项目.

长和铋离子掺入, 熔料中加入少量  $B_2O_3$ , 并适当选择沿坩埚垂直方向的负温度梯度, 使单晶尽量生长在坩埚底部或沿坩埚边壁. 在晶体生长过程中, 坩埚的最高转速为 60 r/min, 加速旋转周期为 8min.

生长出的  $GdBiIG$  块状晶体表面规则、有光泽, 一般线度约为 3~4mm, 最大线度约为 8mm. 根据晶体的 X-射线粉末衍射数据, 可确定其为石榴石相,  $\langle 110 \rangle$  方向晶片 X-射线衍射峰图谱表明, 晶体为单晶, 其组份以 X-射线能谱仪测得, Bi 含量  $x = 0.71$ .

## 2 稀土石榴石单晶的磁光性能

为便于磁光法拉弟旋转谱的测量, 先将块状单晶体经 X-射线定向, 沿 (111) 面切割, 并仔细研磨、抛光制成厚度为  $150\mu m$  的薄片状测试样品.

磁光法拉弟旋转谱是在 CGX-1 型磁光旋转测试仪上按磁光调制倍频法<sup>[6]</sup>进行的, 其测量装置如图 1 所示. 测量时在处于相互垂直的起偏器与检偏器之间放置磁光调制器与被测样品, 以出现光电倍频信号作为测量基准. 因波长范围为近红外, 所以光源用卤素灯.

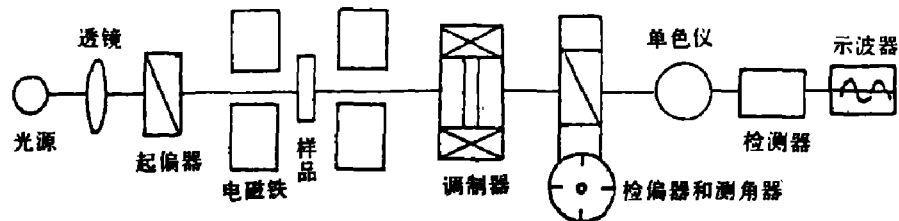


图 1 法拉弟旋转测试装置简图

Fig.1 Schematic diagram of the apparatus used to measure the Faraday rotation

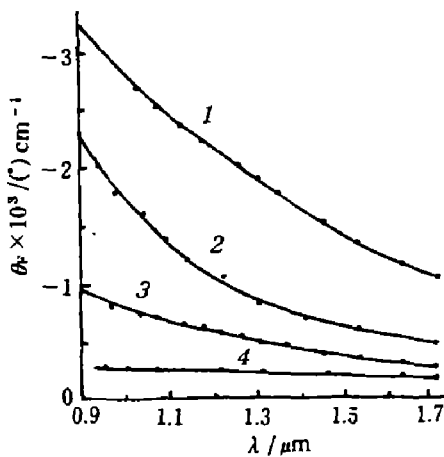


图 2 磁光晶体的法拉弟旋转谱  
 1- $Gd_{2.29}Bi_{0.71}Fe_5O_{12}$  (块状晶体)  
 2- $(BiTm)_3(FeGa)_5O_{12}$  (薄膜)  
 3- $Bi_{0.5}Ca_{2.5}Fe_{3.75}V_{1.25}O_{12}$  (块状晶体)  
 4-YIG (块状晶体)

Fig.2 The Faraday rotation spectra for magnetooptic crystals

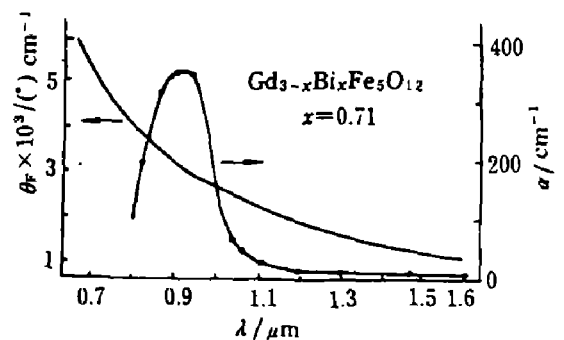


图 3 近红外波段  $Gd_{2.29}Bi_{0.71}Fe_5O_{12}$  的光吸收系数  $\alpha$  ( $cm^{-1}$ ) 与法拉弟旋转角  $\theta_F$  ( $deg/cm$ )  
 Fig.3 Faraday rotation and optical absorption coefficient in the near infrared region for  $Gd_{3-x}Bi_xFe_5O_{12}$  ( $x = 0.71$ )

图 2 给出  $\text{Gd}_{2.29}\text{Bi}_{0.71}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  样品的磁光法拉弟旋转谱的测量结果. 为了进行比较, 图中还画出用同一方法对 YIG、 $\text{Bi}_{0.5}\text{Ca}_{2.5}\text{Fe}_{3.75}\text{V}_{1.25}\text{O}_{12}$ 、 $(\text{BiTm})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$  等样品的测量结果.

图 3 是用近红外傅立叶变换光谱仪所测得  $\text{Gd}_{2.29}\text{Bi}_{0.71}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  样品的光吸收系数  $\alpha$  及旋转角  $\theta_F$ . 图 4 给出此样品在近红外波段的磁光优值  $\theta_F/L$  测量结果, 其中  $L$  是厚度为  $d$  时被测样品薄片的光吸收损耗 (dB),

$$L = \frac{10}{d} \log \frac{I_0}{I} = 4.343\alpha;$$

式中  $I_0$  及  $I$  分别为入射光及出射光光强.

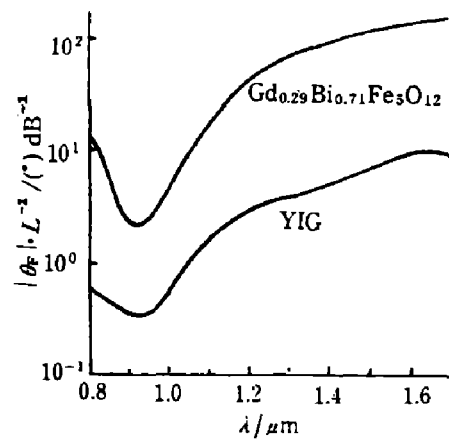


图 4 磁光优值  $|\theta_F|/L$  与波长  $\lambda$  的关系  
Fig.4 Wavelength dependence of the figure of merit for GdBIG and YIG

### 3 讨论

作为光非互易器件的法拉弟旋转介质, 之所以选用铋替代铁磁石榴石型材料, 主要是由于这类材料在近红外波段光吸收损耗很小, 而旋转角又较大. 但是, 在实验上要长出高铋替代的稀土铁石榴石单晶还是相当困难的, 其原因是:

(1) 以  $\text{PbO}$  和  $\text{B}_2\text{O}_3$  为助熔剂生长 YIG 的方法, 对于高铋替代稀土铁石榴石单晶的生长已不再有效. 一般采用  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  作主要助熔剂更为合适. 但由于  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ - $\text{Fe}_2\text{O}_3$ - $\text{R}_2\text{O}_3$  三元系本身可以形成几种单晶相, 相互干扰较大, 要长出单相的 GdBIG 是不容易的.

(2) 在 GdBIG 结构中,  $\text{Gd}^{3+}$  处于氧十二面体中心位置, 由于  $\text{Bi}^{3+}$  离子半径 (0.12 nm) 大于  $\text{Gd}^{3+}$  离子半径 (0.11 nm), 因此 GdBIG 的晶格常数必将随  $\text{Bi}^{3+}$  对  $\text{Gd}^{3+}$  替代的增加而增大. 然而, 石榴石结构的最大晶格常数不能超过  $1.254 \text{ nm}^{[7]}$ , 所以  $\text{Bi}^{3+}$  离子只能部分地取代  $\text{Gd}^{3+}$  离子. 按 Hansen<sup>[8]</sup> 估计, 对于  $\text{Gd}_{3-x}\text{Bi}_x\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ , 最大的  $x$  约为 1.7. 我们生长的  $\text{Gd}_{2.29}\text{Bi}_{0.71}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  晶体, 铋含量  $x=0.71$ , 测得其晶格常数  $a=1.252 \text{ nm}$ , 比  $\text{Gd}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  的晶格常数 (1.2475 nm) 稍大一些.

表征晶体磁光性能的主要参数是磁光优值. 从图 4 可见, 在近红外波段, GdBIG 晶体的磁光优值特别大, 比 YIG 的磁光优值约大一个数量级, 可见 GdBIG 是制作法拉弟旋转光器件较好的一种材料.

### 参 考 文 献

- 1 Tsushima K et al. *IEEE Trans. on Mag.*, 1987, MAG-23(5): 3473
- 2 Wittekoek S et al. *Phys. Rev. Letts.*, 1972, 28: 740
- 3 Takeuchi H et al. *Jan. J. Appl. Phys.*, 1973, 12(3): 465
- 4 曹关鑫, 马昌贵. *磁性材料与器件*, 1989, 20(3): 34-40
- 5 玉城孝彦, 对马国郎. *日本应用磁气学会志*, 1985, 9(2): 125~128
- 6 刘公强, 刘湘林. *光学学报*, 1984, 4(7): 588
- 7 Geller S et al. *Appl. Phys. Letts.*, 1963, 3: 21
- 8 Hansen P et al. *Phys. Rev.*, 1983, B27(7): 4375

## MAGNETO-OPTIC PROPERTIES OF GdBiIG BULK CRYSTALS IN NEAR-INFRARED WAVELENGTH RANGE

Zhang Shouye, Zhang Zhiliang, Huang Min  
Guo Yongjian, Cai Wenyon, Xu Zhicheng

*(Material Science and Engineering Department, Zhejiang University,  
Hangzhou, Zhejiang 310027, China)*

**Abstract:** Using bismuth oxides as a main flux to grow GdBiIG crystals in a platinum crucible which is in accelerated rotation during processing, GdBiIG single crystals are successfully grown, and determined by directional X-ray diffraction and powder X-ray diffraction. The magneto-optic rotation spectra are measured by the magneto-optically modulated double-frequency method in the near-infrared region (0.9~1.7  $\mu\text{m}$ ). It is shown that the optical figure of merit  $|\theta_F|/L$  of GdBiIG crystals is larger than that of other rare-earth iron garnets.

**Key words:** magneto-optic crystals, Faraday rotation.