

# 用于光纤电流传感器的 BGO 晶体磁光特性研究\*

王美蓉 周王民 张 鹏 赵建林 张 浩

(西北工业大学理学院光信息科学与技术研究所, 西安 710072)

**摘 要** 在理论分析  $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$  (BGO) 晶体磁光特性的基础上, 利用倍频法测量了不同工作波长下 BGO 晶体的费尔德常量, 获得了与理论相符的实验结果. 同时根据 BGO 晶体费尔德常量随波长的变化关系曲线, 通过对该晶体吸收系数的测量, 得出了其磁光优值曲线. 进而将 BGO 晶体的磁光特性与光纤电流传感器常用的几种磁光材料作了对比, 结果表明 BGO 晶体适合用于光纤电流传感器.

**关键词**  $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$  晶体; 费尔德常量; 磁光优值; 光纤电流传感器

**中图分类号** TP212.14 **文献标识码** A

## 0 引言

光纤电流传感器是最新发展起来的一类新型传感器, 由于其小型化、绝缘性好、准确度高、动态范围大等优点, 使其在电力系统的高电压大电流测量上有着非常重要的应用前景. 基于法拉第磁光效应的光纤电流传感器是其中发展最为成熟的一种<sup>[1~4]</sup>. 法拉第光纤电流传感器可分为全光纤型电流传感器(功能型)、块状光学玻璃型和闭合磁环型电流传感器(非功能型). 全光纤型电流传感器因其传光与传感部分均采用光纤, 而光纤内部的线性双折射效应使仪器的测量误差大大增加, 故而这种传感器至今尚未实用化. 块状光学玻璃型和闭合磁环型传感器其信号不受光纤中线性双折射的影响, 稳定性优于全光纤型, 是目前已接近于实用化的系统<sup>[5~9]</sup>. 这两种光纤电流传感器的性能主要取决于传感材料的磁光特性及温度稳定性, 它们要求材料具有大的费尔德常量和低温度灵敏度等. 所以磁光材料的研究是法拉第光纤电流传感器中的一个重要问题<sup>[10,11]</sup>.  $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$  (BGO) 作为一种优良的闪烁晶体已被广泛地应用于高能物理研究和核医学. 同时, BGO 晶体也是一种优良的电光晶体, 被大量用于光学电压传感器<sup>[12,13]</sup>. 此外该晶体还具有较强的磁光效应, 但利用其作为光纤电流传感器传感材料的研究报道尚较少. 本文主要从理论和实验两个方面研究了 BGO 晶体作为光纤电流传感器传感元件的磁光特性.

## 1 理论分析

由固体的磁性理论可知, 不含顺磁离子( $d$  壳层不满的过渡族元素或  $f$  壳层不满的稀土族元素)的

固体材料是由饱和结构的原子实和载流子构成的, 呈现微弱的顺磁性, 称为抗磁性材料. BGO 晶体具有立方结构, 属  $\bar{4}3m$  点群. 在晶体结构中,  $\text{Bi}^{3+}$  周围有 6 个  $\text{GeO}_4$  四面体, 而 Bi 是 83 号元素, 外层电子为  $6s^2 6p^3$ , 则  $\text{Bi}^{3+}$  失去了 6p 层的 3 个电子, 但其内部不包含不满的壳层, 所以  $\text{Bi}^{3+}$  无固有磁矩, 同理 Ge 是 32 号元素, 其外层电子分布为  $4s^2 4p^2$ , 在失去 4 个电子后成为  $\text{Ge}^{4+}$  也不包含不满壳层. 因此, BGO 晶体中不包含顺磁离子属于抗磁性晶体.

根据法拉第效应, 当一束线偏振光通过置于磁场中的晶体后, 其偏振面的旋转角度  $\theta$  正比于磁感应强度  $B$  和光在磁场中的传播距离  $L$ , 即

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

式中  $V$  为费尔德 (Verdet) 常量, 与光波长有关, 且受温度影响. 在晶体的共振吸收区域以外, 描述晶体正常色散特性的 Sellmeier 公式为

$$n^2 = 1 + \sum \frac{b_i \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_i^2} \quad (2)$$

式中  $\lambda$  为光波长,  $\lambda_i$  为色散电子的共振波长,  $n$  为晶体的折射率,  $b_i$  为相应系数. 由抗磁性材料的法拉第效应理论, 可推导出 BGO 晶体的费尔德常量表达式为<sup>[13]</sup>

$$V = \frac{e}{2mc} \lambda \frac{dn}{d\lambda} \quad (3)$$

式中  $e$  为电子电量,  $m$  为电子质量,  $c$  为光在真空中的传播速度. 由式(2)和式(3)可推导出抗磁性介质费尔德常量随波长变化的关系为

$$V = \frac{1}{n} \sum \frac{k_i \lambda^2 \lambda_i^2}{(\lambda^2 - \lambda_i^2)^2} \quad (4)$$

式中  $k_i$  为相应的系数. 由式(4)可以看出 BGO 晶体的费尔德常量与波长有关, 而与温度无直接关系. 但当温度变化时, 晶体会发生热胀冷缩, 从而会引起共振频率以及晶体折射率等因素的变化. 因此, BGO 晶体的费尔德常量也会受到温度影响.

\*西北工业大学研究生创业种子基金资助项目(Z20040062)  
Tel: 029-88495724 Email: meirong\_wang@eyou.com  
收稿日期: 2005-01-04

## 2 费尔德常量的测量

实验所用的纯质 BGO 晶体由中国科学院上海硅酸盐研究所提供, 晶体样品尺寸为  $13.0 \times 7.6 \times 7.8 \text{ mm}^3$ , 通光方向平行于长边. 法拉第旋转角采用磁光调制倍频法测量, 实验装置如图 1. 由激光器 Laser 发出的细光束经起偏器  $P_1$  后成为线偏振光. 该线偏光通过置于由电磁铁 EM 产生的磁场中的 BGO 晶体样品后, 光束的偏振面发生了旋转, 进而再经磁光调制器 M 调制, 并在通过检偏测角仪  $P_2$  后由光电二极管 D 接收. 光电流经放大器放大后由示波器显示. 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.

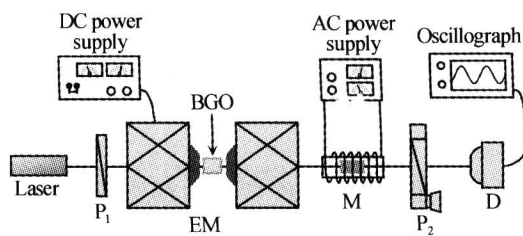


图 1 BGO 晶体法拉第旋转角测量实验装置  
Fig. 1 Experimental setup for measuring the Faraday rotation of a BGO crystal

实验中分别测量了波长为 532 nm、633 nm、650 nm 和 670 nm 时 BGO 晶体的费尔德常量. 图 2 给出了对应四种不同波长下测量得到的 BGO 晶体的法拉第转角  $\theta$  与磁感应强度  $B$  之间的关系曲线. 由  $\theta$  与  $B$  的关系曲线可以得到晶体的费尔德常量分别为  $2.658^\circ/(\text{T} \cdot \text{mm})$ 、 $1.751^\circ/(\text{T} \cdot \text{mm})$ 、 $1.667^\circ/$

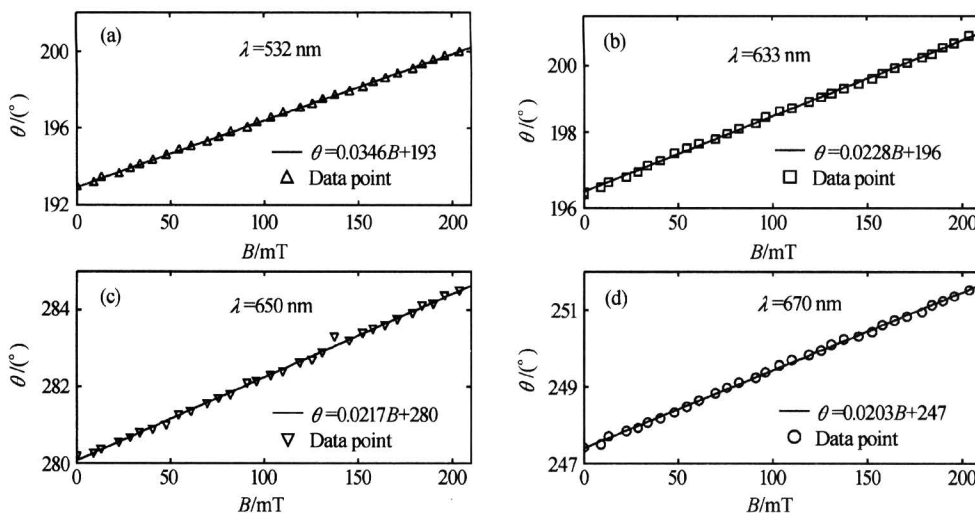


图 2 法拉第旋转角与磁感应强度的关系曲线  
Fig. 2 The Faraday rotation angle versus amplitude of the magnetic induction

$(\text{T} \cdot \text{mm})$  和  $1.559^\circ/(\text{T} \cdot \text{mm})$ .

## 3 费尔德常量随波长的变化关系和磁光优值

### 3.1 费尔德常量随波长的变化关系

由式(4)可知, 给定与晶体性质有关的常量 ( $n$ 、 $k_i$  和  $\lambda_i$ ), 就可以得到不同波长下晶体费尔德常量的理论值. BGO 晶体在不同波长处的折射率已由 Borfeld 等测得<sup>[14]</sup>, 利用柯西公式对测量数据点进行拟合可以得到该晶体的色散关系为

$$n(\lambda) = \sqrt{4.2 + \frac{5.41 \times 10^4}{\lambda^2} + \frac{1.04 \times 10^{10}}{\lambda^4}} \quad (5)$$

图 3(a) 为晶体的色散关系曲线, 其中三角形代表测量数据点, 实线代表拟合曲线. 根据参考文献<sup>[15]</sup>的分析, 按单振子模型计算, 可以取参量  $k_1 = 30.6^\circ/(\text{T} \cdot \text{mm})$ ,  $\lambda_1 = 200 \text{ nm}$ , 结合式(5)可以得出 BGO 晶体费尔德常量随波长的变化关系为

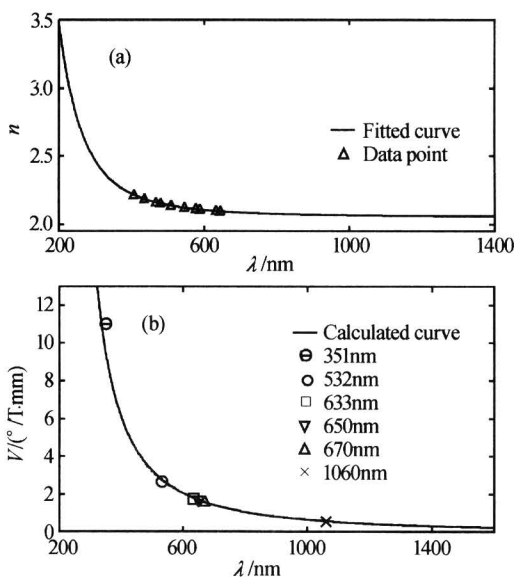


图 3 BGO 晶体的 (a) 色散曲线和 (b) 费尔德常量随波长的变化关系曲线  
Fig. 3 Curves of (a) dispersion and (b) Verdet constant versus wavelengths of the BGO crystal

$$V = \frac{1.224 \times 10^6 \lambda^4}{(\lambda^2 - 4 \times 10^4)^2 \sqrt{4.2 \lambda^4 + 5.41 \times 10^4 \lambda^2 + 1.04 \times 10^{10}}} \quad (6)$$

计算结果如图 3(b), 其中实线为理论曲线, “ $\ominus$ ”和“ $\times$ ”分别为参考文献[16]和[17]中给出的实验测量数据点, 其余为本文实验测量得到的数据点. 表 1 给出了不同工作波长下 BGO 晶体的费尔德常量测量值与理论值对比的结果. 从图 3(b)和表 1 可以看出, BGO 晶体的费尔德常量随着波长的增加逐渐减小. 而且实验测量结果与理论计算结果符合得较好, 只有微小偏差. 引起这一偏差的主要原因可能是实验使用的电磁铁中间部分磁场分布不均匀.

表 1 BGO 晶体费尔德常量( $^{\circ}/(\text{T} \cdot \text{mm})$ )实验值与理论值的对比

| 波长/nm                | 理论值   | 实验值   | 相对误差   |
|----------------------|-------|-------|--------|
| 351 <sup>[16]</sup>  | 9.441 | 11    | 14.17% |
| 532                  | 2.759 | 2.658 | 3.66%  |
| 633                  | 1.797 | 1.751 | 2.56%  |
| 650                  | 1.688 | 1.667 | 1.24%  |
| 670                  | 1.572 | 1.559 | 0.83%  |
| 1060 <sup>[17]</sup> | 0.568 | 0.550 | 3.17%  |

### 3.2 磁光优值

磁光优值是磁光材料的重要参量之一, 它定义为磁光晶体的比法拉第旋转角与光吸收损耗之比, 用于表征材料磁光性能的优劣. 实验中 BGO 晶体的吸收系数曲线是由紫外-可见-红外分光光度计测量得到的透过率曲线换算而来的. BGO 晶体的吸收系数曲线如图 4(a). 由式(6)以及图 4(a)可得 BGO 晶体的磁光优值曲线如图 4(b). 由该图可以

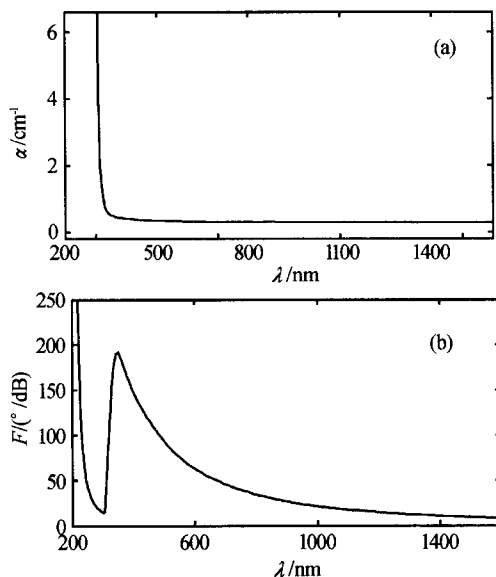


图 4 BGO 晶体的(a)吸收系数曲线和(b)磁光优值曲线  
Fig. 4 Curves of (a) absorption coefficient and (b) the magneto-optical figure of merit of the BGO crystal

看出在波长为 350 nm 左右磁光优值出现了一个波峰达到极大值. 在  $\lambda < 350$  nm 区域, 当波长为 300 nm 左右出现极小值, 在共振吸收波长附近磁光优值趋于无穷大; 当  $\lambda > 350$  nm 时, 随着波长的增大, 磁光优值逐渐减小.

## 4 与几种常用磁光玻璃材料的比较

在选择光纤电流传感器传感头的材料时, 要求传感材料具备大的费尔德常量值和低的温度敏感性以及高的磁光优值等. 一般来说, 顺磁性介质、铁磁性介质和亚铁磁性介质的费尔德常量值虽然较大但随温度的变化也很大, 而且后两种介质还存在磁饱和现象, 所以通常可以排除这些介质. 而抗磁性材料的费尔德常量值与前面几种介质相比虽然较小, 但它随温度的变化也很小, 因此抗磁性材料是制作光纤电流传感器传感头的首选材料. 抗磁性光学玻璃由于其费尔德常量对温度不敏感, 加之具有良好的透过性, 因此被大量用作块状和全光纤型电流传感器的敏感元件. 在众多的光学玻璃中, SF-57 玻璃是最佳选择, 因为其费尔德常量比绝大多数光学玻璃都大. 目前普遍使用的还有重火石玻璃 SF-6, 其费尔德常量的温度系数约为  $10^{-4} \text{K}^{-1}$ , 一般可不需做温度补偿.  $\text{SiO}_2$  的各种性能是在使用光纤作为传感头的电流传感器中表征传感器性能的重要指标. 表 2 给出几种磁光材料与 BGO 晶体磁光性能的比较. 从表中可以看出, BGO 晶体是一种优良的磁光材料, 具有较大的费尔德常量. 在可见光区域 BGO 晶体的费尔德常量是石英晶体的 8 倍多, 是 SF-57 玻璃的 1.5 倍多, 而且其温度系数很小, 与 SF-6 和 SF-57 玻璃在同一数量级上. BGO 晶体大的费尔德常量值和它在 305 nm 到 6000 nm 之间良好的光学透过性, 使得其在磁光应用上具有非常大的潜力. 值得注意的是它还是性能优良的电光晶体, 使得电压与电流的传感可以结合为一体.

表 2 BGO 晶体与几种磁光材料的比较( $\lambda = 633$  nm)

| 材料             | 费尔德常量<br>$/(^{\circ}/\text{T} \cdot \text{mm})$ | 温度系数( $\frac{1}{V} \frac{dV}{dT}$ )/ $\text{K}^{-1}$ |
|----------------|-------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| BGO            | 1.797                                           | $6.20 \times 10^{-4}$ <sup>[15]</sup>                |
| SF-57          | 1.150                                           | $1.29 \times 10^{-4}$ <sup>[18]</sup>                |
| SF-6           | 1.017                                           | $1.00 \times 10^{-4}$ <sup>[19]</sup>                |
| BK-7           | 0.230                                           | $0.56 \times 10^{-4}$ <sup>[18]</sup>                |
| $\text{SiO}_2$ | 0.210                                           | $0.81 \times 10^{-4}$ <sup>[18]</sup>                |

## 5 结论

本文在理论分析 BGO 晶体磁光特性的基础上计算了其费尔德常量随波长变化的关系曲线, 并用磁光调制倍频法测量了几种不同工作波长下 BGO

晶体的费尔德常量值,理论值与实验值基本相符.通过对晶体吸收系数的测量,给出了 BGO 晶体的磁光优值曲线,并将 BGO 晶体的磁光特性与光纤电流传感器常用的几种磁光材料作了对比,结果表明 BGO 晶体是一种优良的磁光材料,较适合作为光纤电流传感器的传感元件.另外,BGO 晶体在光学电压传感器上已应用很广,所以可以利用同一块晶体来同时测量高压线上的电流、电压和电功率.因此,BGO晶体在电力部门将有更广阔的应用前景.

本课题实验所用 BGO 晶体由中国科学院上海硅酸盐研究所冯锡洪研究员提供,在此表示感谢.

#### 参考文献

- 1 Song J, McLaren P G, Thomson D J, *et al.* A clamp-on magneto-optical current transducer for power systems. *Proc CCECE IEEE*, 1996, 884~887
- 2 Tang D, Rose A H, Day G W. Practical considerations in the design of optical fiber current sensor. *Proc SPIE*, 1990, **1267**: 29~34
- 3 Yi B, Chu B C B, Ching K S. Magneto-optical electric-current sensor with enhanced sensitivity. *Measurement Science and Technology*, 2002, **13**: N61~N63
- 4 刘晔, 邹建龙, 王采堂, 等. 三相光学电流互感器中的光耦合器. *光子学报*, 2001, **30**(4): 504~507  
Liu H, Zou J L, Wang C T, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(4): 504~507
- 5 Wang Z P, Zhang S Q, Zhang L B. *Recent advances in optical current-sensing techniques*. *Sensor and Actuators A*, 1995, **50**: 169~175
- 6 王政平, 李庆波, 刘晓瑜, 等. 线性双折射对光学玻璃电流传感器输出特性影响的理论分析. *光子学报*, 2004, **33**(7): 818~822  
Wang Z P, Li Q B, Liu X Y, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(7): 818~822
- 7 Emerging technologies working group, Fiber optic sensors working group. Optical current transducers for power systems: a review. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1994, **9**(4): 1778~1788
- 8 Lee B. Review of the present status of optical fiber sensors. *Optical Fiber Technology*, 2003, **9**: 68~71
- 9 李红斌. 实用化光学电流传感器光路系统的研究. *光子学报*, 1996, **25**(12): 1109~1114  
Li H B. *Acta Photonica Sinica*, 1996, **25**(12): 1109~1114
- 10 Zhao W Z. Magneto-optic properties and sensing performance of garnet YbBi : YIG. *Sensor and Actuator A*, 2001, **89**: 250~254
- 11 Yi B, Cruden A, McDonald J R, *et al.* A novel bulk-glass current transducer having an adjustable multi-ring optical path. *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, 1997, 879~882
- 12 Cui Y, Ye M Y, Zhu Y, *et al.* Research on 220 kV combined optical transformer. *Proc SPIE*, 2000, **4220**: 292~296
- 13 廖延彪. 偏振光学. 北京: 科学出版社, 2003. 296~300  
Liao Y B. *Polarized Optics*. Beijing: Science Press, 2003. 296~300
- 14 Bortfeld D P, Meier H. Refractive indices and electro-optic coefficients of the eulites  $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$  and  $\text{Bi}_4\text{Si}_3\text{O}_{12}$ . *Appl Phys*, 1972, **43**(12): 5110~5111
- 15 王焕元, 贾惟义, 沈建祥.  $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$  晶体的磁光法拉第旋转. *物理学报*, 1985, **34**(1): 126~128  
Wang H Y, Jia W Y, Shen J X. *Acta Physica Sinica*, 1985, **34**(1): 126~128
- 16 Feng X Q, Tang T B.  $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ : An integrated magneto-and acousto-optical, photorefractive and lasing material. *Proc of the International Conference on Quantum Optics and Laser Physics*, 1995, 392~395
- 17 Feng X Q, Hu G Q, Yin Z W. Growth, Laser and magneto-optic properties of Nd-doped  $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$  crystals. *Mat Sci Eng*, 1994, **B23**: 83~87
- 18 Williams Paul A, Rose A H, Day G W, *et al.* Temperature dependence of the Verdet constant in several diamagnetic glasses. *Appl Opt*, 1991, **30**: 1176~1178
- 19 Yi B S, Chu B C B. New design of optical electric-current sensor for sensitivity improvement. *IEEE Transaction Instrumentation and Measurement*, 2000, **49**(2): 418~423

## Investigations of Magneto-optical Properties of BGO Crystal Utilized for Optical Fiber Current Sensor

Wang Meirong, Zhou Wangmin, Zhang Peng, Zhao Jianlin, Zhang Hao

*Institute of Optical Information Science and Technology, School of Science, Northwestern*

*Polytechnical University, Xi'an 710072*

Received date: 2005-01-04

**Abstract** Based on the theoretical analyses of the magneto-optical properties of a  $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$  (BGO) crystal, the Verdet constants of a BGO crystal at different wavelengths are measured employing the double frequency method. And the experimental results agree with the theoretical value. Combine the measured absorption coefficients with the relations between the Verdet constant and the light wavelengths, the magneto-optical figure of merit of the BGO crystal is presented. Additionally, the magneto-optical properties of a BGO crystal are compared with that of some magneto-optical materials usually used for optical fiber current sensor. The results show that BGO crystal is more suitable for fabricating optical fiber current sensors.

**Keywords**  $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$  crystal; Verdet constant; Figure of merit; Optical fiber current sensor



**Wang Meirong** was born in 1977, received her B. S. degree in automatic control from Northwestern Polytechnical University in 2000. Now she is pursuing her Master degree in Institute of Optical Information Science and Technology, School of Science, in the same University. Her main research direction is optical fiber sensors.