

磁滞及磁饱和效应对磁光光纤传感器的影响

胡永明¹ 孟洲² 陈哲¹ 廖延彪¹ 曹动² 倪明²

(¹ 清华大学电子工程系 北京 100084; ² 国防科技大学应用物理系 长沙 410073)

提要 给出了 Inr-BiCaVIG 晶体的磁滞回线, 详细分析了磁滞及磁饱和效应对磁光光纤传感器的影响。当所测磁场信号为交变量时, 磁滞的影响主要是相位延迟, 对幅度及频谱分布影响较小; 饱和效应不仅使响应幅值减小, 同时还导致明显的频谱变化。

关键词 磁光光纤传感器, 磁滞特性, 磁饱和效应, Inr-BiCaVIG 晶体

1 引言

近几十年来, 人们对含 Bi^{3+} 的铁石榴石晶体的磁光性质越来越重视^[1,2], 主要由于这类晶体在可见光和红外有很大的法拉第旋转 θ_F 和相对低的光吸收 α 。高的磁光优值 (θ_F/α) 给这类晶体在各种磁光器件中的应用带来光明的前景, 人们试图用 Inr-BiCaVIG (分子式为 $\{\text{Bi}_{3-x}\text{Ca}_{2x}\}[\text{Fe}_{2-y}\text{In}_y](\text{Fe}_{3-x}\text{V}_x)\text{O}_{12}$) 晶体替代传统的 YIG 晶体制造各种磁光器件, 目前主要用 Inr-BiCaVIG 晶体制作磁光隔离器, 用于现代通信中发展最快的光纤通信技术中^[3]。我们利用其 θ_F 比 YIG 晶体大 1~2 个数量级^[4] 的特点, 将其用作磁场光纤传感器件, 以提高磁场测量灵敏度。但是此晶体具有明显的磁滞特性和较低的饱和磁场, 对传感测试精度有较大影响。本文将给出晶体磁滞特性和饱和特性的测试结果, 并通过计算机仿真详细分析它对磁场光纤传感的影响。

2 Inr-BiCaVIG 晶体磁场光纤传感器原理

图 1 给出了光纤磁场传感系统结构, 图中 LD 为系统光源, P_1 为光纤起偏器, P_2 为光纤检偏器, C 为磁光晶体, S_1, S_2 为自聚焦透镜, 系统所测磁场 \vec{H} 方向平行于光传播方向, D 为探测器。系统传感原理是利用法拉第效应实现磁场对光偏振态的调制, 通过测得光信号而推出磁场强度。

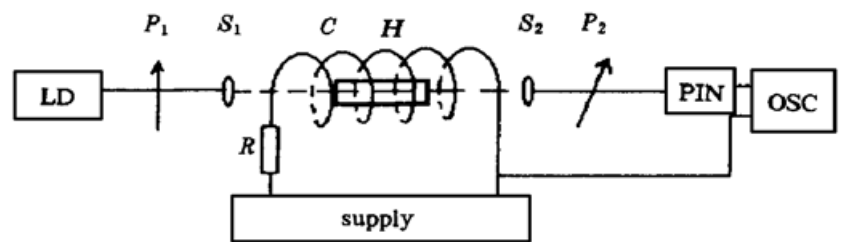


图 1 磁场光纤传感器结构简图

Fig. 1 Schematic diagram of the magnetic field fiber sensor

* 863 激光技术青年基金和国防科技试验技术资助项目。

收稿日期: 1997-11-28; 收到修改稿日期: 1998-03-09

忽略结晶各向异性, 磁化试样所需饱和磁场

$$H_s = NM_s$$

式中 N 为退磁因子, M_s 为饱和磁化强度。

理论推导^[5] 可证明, 对于强磁性材料, 因磁化强度 M 与外加磁场 H 关系的非线性和存在磁饱和, 法拉第旋转角 θ 和 H 之间并不是简单的正比关系。严格地说, 定义费尔德常数意义不大, 只有对矫顽力 H_c 很小的软磁材料, 在饱和以下磁化, 其法拉第旋转 θ 与 H 成直线关系, 如图 2 所示。

图 1 中, 在饱和磁场以下, 即 $H < H_s$ 时, 偏振光经过 Ir-BiCaVIG 晶体的旋转角为

$$\theta = VH\mu L \quad (2)$$

V 为晶体的费尔德常数, L 为晶体沿光线方向的长度, H 为晶体上所加磁场强度, μ 为磁导率。

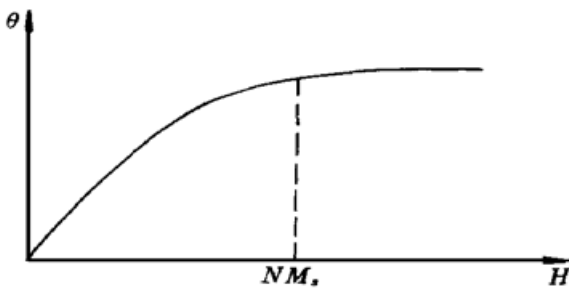


图 2 法拉第旋转角 θ 与外加磁场 H 的关系

Fig. 2 Relation between the Faraday rotation angle θ and the external magnetic field H

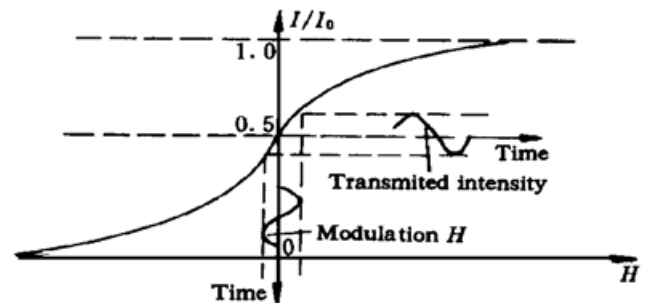


图 3 磁场光纤传感器传递函数

Fig. 3 The transfer function of the magnetic field fiber sensor

为将工作点设在线性区, 取 P_1 与 P_2 夹角为 $\pi/4$ 。晶体长度 $L < 1$ mm, 晶体吸收系数 α 也相对低 ($\sim 10/\text{cm}$), 因此晶体对光能量的吸收可忽略。由马吕斯定律推算出

$$I/I_0 = \frac{1}{2}[1 + \sin(2V\mu LH)] \quad (3)$$

式中 I_0 为射入 Ir-BiCaVIG 晶体的光强, I 为检偏器的出射光强。当 θ 较小时, $\theta \approx \sin\theta$, 上式可近似成

$$I/I_0 = \frac{1}{2}(1 + 2V\mu LH) \quad (4)$$

在忽略磁滞情况下, 由式(3) 可得传感器所测场强 H 与光强调制 I/I_0 的关系曲线如图 3 所示。

3 磁滞特性测试及结果分析

Ir-BiCaVIG 晶体的磁光效应及磁滞、磁饱和特性测试装置如图 1 所示, 光纤磁光探头在长直螺线管中心, 螺线管长度远远大于晶体长度, 可认为晶体所在处为均匀磁场。使螺线管的电流连续变化, 可在螺线管内产生连续变化的磁场。螺线管两端电信号和探测器信号同时输入示波器, 可得到晶体的磁滞、磁饱和特性曲线。

图 4 是 Ir-BiCaVIG 晶体的两组典型磁滞回线。在所测磁场强度 $H \geq H_s$ 和 $H < H_s$ 两种情况下, 晶体磁滞回线差别较大。从图 4(a) 可知晶体磁饱和强度约为 0.01 T, 晶体矫顽力 $H_c < H_s/6$, 说明 Ir-BiCaVIG 晶体属于软磁材料。显然, 因磁滞的存在, H 与 I/I_0 不再是一一对应关

系, 即传感系统某时刻测得的光强调制信号 I/I_0 不单纯由此时的 H 决定, 还与晶体前一刻的状态有关。对静态场的测量最大误差可达 30%, 这使得该晶体不能用作静态磁场的传感。

在磁光传感中, 对交变场的传感有着十分重要的意义。现假设被测磁场为一频率为 f_0 的

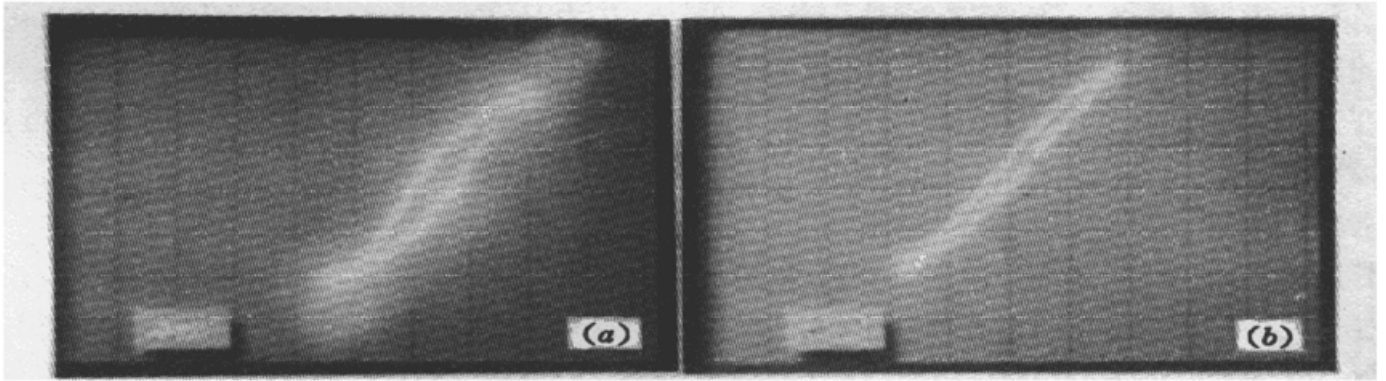


图 4 Ir-BiCaVIG 晶体磁滞回线

Fig. 4 The magnetic hysteresis curve of Ir-BiCaVIG crystal

(a) $H \geq H_s$; (b) $H < H_s$

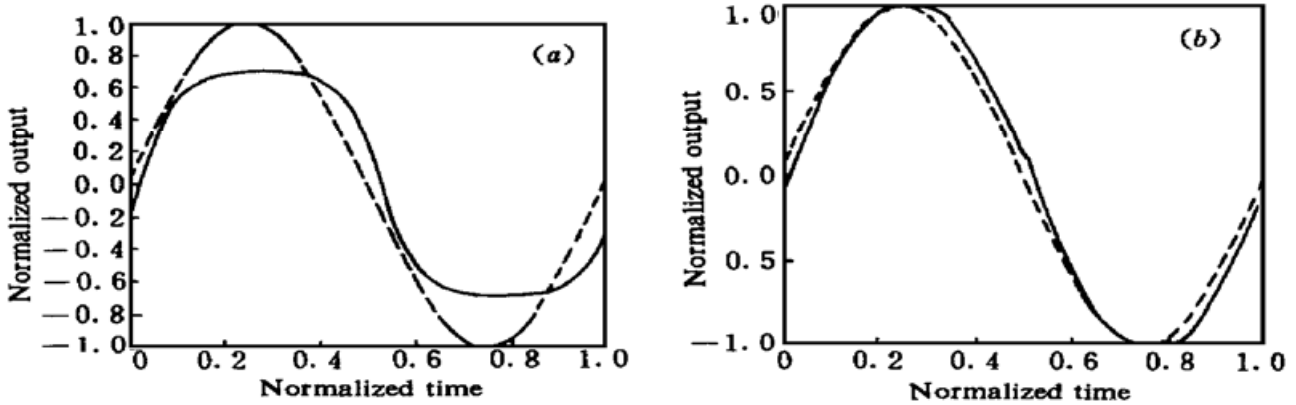


图 5 Ir-BiCaVIG 晶体谐波响应曲线

Fig. 5 Sinusoid wave response curve of Ir-BiCaVIG crystal

(a) $H \geq H_s$; (b) $H < H_s$

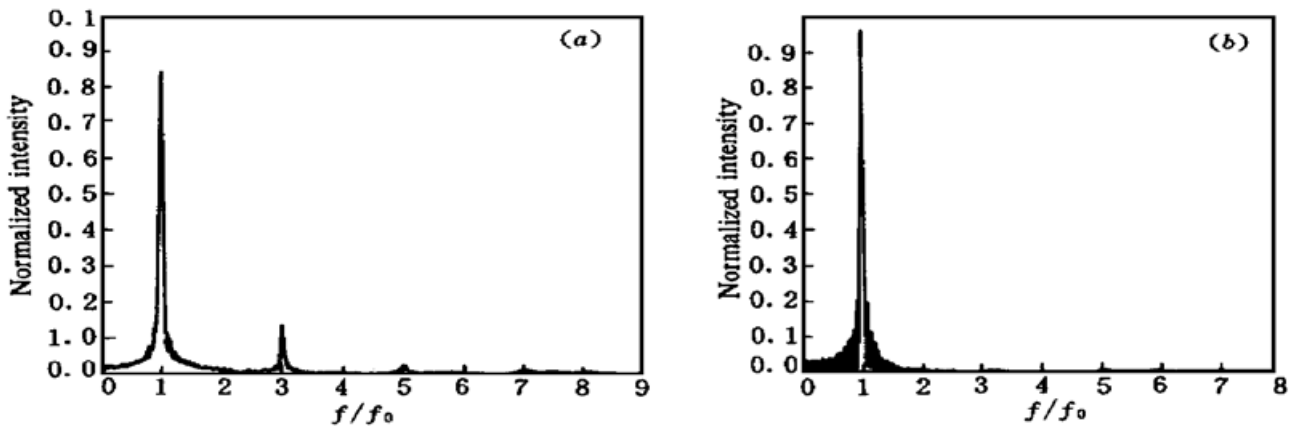


图 6 谐波响应曲线频谱图

Fig. 6 Frequency spectrum of sinusoid wave response curve

(a) $H \geq H_s$; (b) $H < H_s$

谐波, 针对图 4(a), (b) 两条磁滞回线, 计算机仿真出传感器响应曲线分别如图 5(a), (b) 所示。图中虚线为忽略磁滞的情况下传感器的响应曲线, 实线则为传感器实际响应曲线。再对实

线作傅里叶变换,可得到其频域信息如图 6 所示。结果分析表明,磁饱和效应使传感器响应的幅值减小,频谱分布发生变化。幅值的减小随着饱和程度的加深而增大,当 $H = H_s$ 时,幅值已下降 30%; 频谱的变化主要是 $3f_0, 5f_0, 7f_0, \dots$ 等奇次谐波的出现,随着饱和程度的加深,基波幅值减小,高次谐波值增大,当 $H = H_s$ 时, $f_0, 3f_0, 5f_0, 7f_0$ 的幅度比为 85: 15: 4: 1。磁滞效应的影响主要是相位延迟,它也随饱和程度的加深而增大,当 $H = H_s$ 时,相位滞后约为 $(1/25)f_0$ 。在 $H < 0.8H_s$ 时,传感器仍然工作在线性区,响应波形失真较小,基波幅值下降 1%,相位滞后约 $(1/40)f_0$,高次谐波量很小,可近似认为波形频率未变。

综上所述, Ir-BiCaVIG 晶体有明显的磁滞效应和较低的磁饱和强度。磁滞效应对静态场的测量误差可达 30%,对交变场产生相位延迟,最大值可达 $(1/25)f_0$ 。当 $H \geq H_s$ 时,饱和效应使响应幅值减小,同时有奇次谐波产生,在 $H < 0.8H_s$ 时,忽略磁滞效应带来 H 的测试误差小于 1%。

上述 Ir-BiCaVIG 晶体磁滞、磁饱和特性对光纤传感器影响的分析方法及有关结论同样适合于任何具有磁滞效应的铁磁材料,甚至适用于一些具有电滞效应的材料,如压电陶瓷等。

参 考 文 献

- 1 O. Kamada, H. Minemoto, N. Itoh. Magneto-optical properties of $(\text{BiGdY})_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ for optical magnetic field sensors. *J. Appl. Phys.*, 1994, **75**(10): 6801~ 6803
- 2 Kjell Svantesson, Hans Sohlström, Ulf Holm. Magneto-optical garnet materials in fibre optic sensor systems for magnetic field sensing. *SPIE*, 1990, **1274**: 260~ 269
- 3 Liu Yulong, Zhang Pengxiang, Li Shunfang *et al.*. Lead free single crystals of indium substituted BCVIG and their magneto-optical properties. *Acta Physica Sinica* (物理学报), 1992, **41**(7): 1182~ 1186 (in Chinese)
- 4 Yu Hanyun, Sun Jinzuo. Crystal growth and properties of Ir-BiCaVIG. *Laser Technology* (激光技术), 1995, **19**(6): 361~ 364 (in Chinese)
- 5 Liu Xianglin, Liu Gongqiang, Jin Suigeng. Magneto-optical Materials and Magneto-optical Devices. Beijing: Beijing Science and Technology Press, 1995. 11~ 15 (in Chinese)

Effects of Magnetic Hysteresis and Saturation Effects on a Magneto-optic Fiber Sensor

Hu Yongming¹ Meng Zhou² Chen Zhe¹ Liao Yanbiao¹ Cao Dong² Ni Ming²

¹Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084

²Department of Applied Physics, National University of Defense Technology, Changsha 410073

Abstract In this paper, the magnetic hysteresis curves of Ir-BiCaVIG crystal are given. The effects of magnetic hysteresis and saturation effects on a magneto-optic fiber sensor is analyzed in detail. Magnetic hysteresis affects the phase delay mainly, and less the amplitude and frequency spectrum when the measured magnetic field signal is an alternating quantity. Magnetic saturation effects not only decrease the amplitude, but also change the frequency spectrum obviously.

Key words magneto-optic fiber sensor, magnetic hysteresis properties, magnetic saturation effects, Ir-BiCaVIG crystal