

关于用光折变晶体提高光纤陀螺灵敏度的设想

郑光昭

(广东工业大学 信息工程学院, 广东 广州 510640)

摘要: 光纤陀螺是一种新型的惯性器件. 光纤陀螺的理论灵敏度是最高的. 但目前光纤陀螺的实际灵敏度还远没有达到理论灵敏度的水平, 其主要原因是: 光纤中存在瑞利散射、双折射现象以及其它的非线性效应, 如 Kerr 效应等引起光束非互易的相移. 本文提出利用一种新型的非线性光学材料——光折变晶体的光折变效应来补偿上述非互易相差的设想: 利用光折变晶体的热透镜效应来减弱或消除瑞利散射的影响; 利用光折变晶体的二向相差效应来消除或修正双折射现象和克尔效应的影响, 从而达到提高光纤陀螺的灵敏度的目的.

关键词: 光纤陀螺; 灵敏度; 光折变晶体; 光折变效应

中图分类号: V241.5; O437

文献标识码: A

文章编号: 1007-7162(2005)04-0022-04

惯性器件是应军事需求而发展起来的, 是现代武器装备中一项支撑技术, 在现代高技术战略发展中具有十分重要的作用. 光纤陀螺是当代新型的惯性测量仪表, 美、法、英、德、日、俄等国正处于研制热潮中, 并已走向实用阶段^[1]. 1963 年, 斯佩里陀螺公司在研究光学陀螺中首先取得突破性进展, 第一个实验论证了环形激光陀螺, 现在已大量用于机载捷联式惯性导航系统中. 在 20 世纪 70 年代后期出现了一种新型的光学陀螺, 即光纤陀螺. 自 1976 年美国犹他大学的 Vali 等人实验论证第一个光纤陀螺以来, 光纤陀螺取得了迅速发展, 目前战术用光纤陀螺已商品化, 实验室水平已达惯性级. 我国惯性器件的发展落后于世界发达国家, 激光陀螺和光纤陀螺都有待迅速发展并形成产业.

由于光纤陀螺没有机械转子、轴承及与摩擦有关的机械运动部件, 因而它比机械陀螺的可靠性和准确度均要高得多. 由于光纤陀螺具有重量轻、功耗低、寿命长、可靠性高和成本低的优点, 在某些领域已形成与激光陀螺相竞争的局面. 就理论灵敏度而言, 光纤陀螺的灵敏度是最高的, 可达 $10^{-6} (^{\circ}/h)$. 但是到目前为止, 光纤陀螺的实际灵敏度还远没有达到理论灵敏度的水平. 本文将分析影响光纤陀螺实际灵敏度主要因素, 并提出利用光折变晶体的光折变效应来修正或消除上述影响因素从而达到提高光纤陀螺灵敏度的设想.

1 光纤陀螺

1.1 基本工作原理

光纤陀螺采用的是 Sagnac 干涉体系, 基本光路如图 1 所示. 环形光纤是多圈式的. 当环形光路相对于惯性空间有一转动角速度 Ω 时(Ω 垂直于环形平面), 两路反向行进的光将产生一个非互易的光程差:

收稿日期: 2004-06-29

基金项目: 广东工业大学重点学科基金资助项目(202019; XZ200102)

作者简介: 郑光昭(1945-), 男, 教授, 主要研究方向为光信息技术与光电检测技术.

$$\Delta L = \Omega \cdot 4AN/c. \quad (1)$$

两路光的位相差为

$$\Delta \phi = \Omega \cdot 8\pi AN/(c\lambda), \quad (2)$$

式中, N 为光纤圈数; A 为每圈的面积; c 为光速. 式(2)即为光纤陀螺的基本公式.

采用图1所示结构的光纤陀螺, 探测器D上光强随位相变化, 可用式

$$I = I_0(1 + \cos \Delta \phi) \quad (3)$$

表示. 很显然, 式中 I 与 $\Delta \phi$ 不是线性关系; 且当 $\Delta \phi$ 很小时, I 的变化极不明显. 为此, 常引入一个非互易的位相调制器(如采用 $\lambda/4$ 波片或 45° 放置的磁光调制器等), 使互易光均引入 $\pi/2$ 的相差. 因此, 经直流位相偏置后探测的光强变化为

$$I = I_0(1 - \sin \Delta \phi), \quad (4)$$

这样就克服了上述的二个缺点.

1.2 影响实际灵敏度的主要因素

目前光纤陀螺的实际灵敏度远没有达到理论灵敏度 $10^{-6} (^\circ/\text{h})$ 的水平. 其主要原因是: 1) 光纤中存在瑞利散射, 光学元件的反射使相干光位相差不稳定; 2) 光纤中的双折射现象引起非互易光的相移; 3) 环境温度梯度、声波振动、外磁场干扰等的环境影响; 4) 光纤中存在的非线性效应, 如 Kerr 效应等引起光束非互易的相移. 因此, 要实现达到或接近理论灵敏度的光纤陀螺, 还需进行较长时间的研究^[2,3].

1) 瑞利散射的影响

当光波照射到比光波波长还要小的不均匀微粒时, 光波将向四面八方折射, 这一现象称为瑞利散射. 光纤中的瑞利散射损耗是本征散射损耗. 产生瑞利散射损耗的原因是在制造石英玻璃光纤的过程中, 因为冷却条件的不均匀而使玻璃出现分子级大小的密度不均匀, 从而使玻璃材料的折射率不均匀, 此种不均匀微粒的大小在比光波长还要小时, 引起瑞利散射损耗. 瑞利散射损耗与光波波长 λ^{-4} 成正比例关系. 这表明它随工作波长增加而迅速降低. 此外, 对于掺杂的光纤, 还需要考虑掺杂浓度的均匀性, 因为材料本身的不均匀性同样会产生瑞利散射, 同时掺杂浓度的增加也会使瑞利散射增大.

可见, 瑞利散射使光偏离原来的传播方向, 或者说使原来的波面产生畸变. 这一方面使相干光的位相不稳定, 另一方面也改变了在光纤陀螺中沿两相反方向传播的两束光的非互易的光程差, 从而引起了附加位相差 $\Delta \phi$.

2) 双折射现象的影响

光纤中或多或少存在双折射, 这主要是由光纤剩余应力的不均匀分布、光纤的截面不圆、外部压力、弯曲等原因引起. 特别是弯曲现象在光纤陀螺中是不可避免的, 即使采用极低双折射的光纤也会引进弯曲双折射. 双折射现象的存在使在光纤陀螺中沿两相反方向传播的两束不同偏振方向的光产生了非互易的相移^[4,5].

3) 克尔(Kerr)效应的影响

克尔(Kerr)效应或称为电致双折射效应(二次电光效应). 光纤中的克尔效应是非线性极化

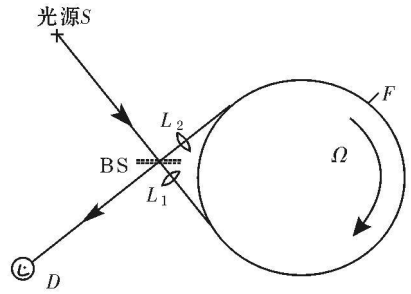


图1 Sagnac型光纤陀螺示意图

导致光纤中的折射率随传输的光功率而变的效应. 当外加电场作用在各向同性的透明物质上时, 各向同性物质的光学性质发生了变化, 变成具有双折射现象的各向异性特性.

设 n_o 、 n_e 分别为介质在外加电场作用后的寻常光折射率和异常光折射率. 当外加电场方向与光的传播方向垂直时, 由感应双折射引起的寻常光折射率和异常光折射率与外加电场 E 的关系为

$$n_o - n_e = K E^2, \quad (5)$$

式中, K 为克尔常数. 在大多数情况下 $n_o - n_e > 0$ (K 为正值). 克尔 (Kerr) 效应的存在也同样使在光纤陀螺中沿两相反方向传播的两束不同偏振方向的光产生了非互易的相移.

2 利用光折变晶体的光折变效应提高光纤陀螺的灵敏度

光折变晶体是一种新兴的非线性光学材料, 由于其独特的光折变效应而备受青睐. 光折变晶体的光折变效应主要包括: 光扇效应、光学二极管效应、自泵浦相位共轭效应、热透镜效应、快速光折变效应等^[6]. 利用光折变晶体的光折变效应可以减小或抵消光纤陀螺的非互易相差, 从而达到提高光纤陀螺的灵敏度的目的.

2.1 利用热透镜效应减弱或消除瑞利散射的影响

所谓热透镜效应就是当一强电磁波通过某一吸收媒质传播时光束受到吸收, 如果沿它的波前有一强度分布, 则将建立起一横向温度梯度, 从而导致了折射率梯度引起光束的聚焦或离焦. 在这里, 媒质起着等效透镜的作用. 令 k 为晶体折射率温度系数, 则折射率随温度的改变量: $n = kT$, T 为温度改变量. 由于所用光束光强呈横向高斯分布, 当 $k > 0$ 时, 通过路径上横向的不均匀加热就导致了正的热透镜效应, 使平行光束聚焦. 对大多数媒质而言, $k < 0$, 因而得到光束的离焦 (散焦). 利用热透镜效应的聚焦作用, 有可能使瑞利散射引起的散射光重新汇聚成细束, 因此热透镜效应有望用于减弱或消除瑞利散射的影响.

2.2 利用二向相差效应减弱或消除双折射现象的影响

作者最近在实验中发现, 光折变晶体具有二向相差效应, 并利用 Sagnac 干涉仪观测了光折变晶体的二向相差效应^[7]. 所谓光折变晶体的二向相差效应, 也就是当光束沿两个相反方向通过同一晶体时具有不同的光程, 从而导致了出现附加位相差. 这一位相差称为二向相差. 实验表明, 这一附加位相差与通光方向和光轴间的夹角有明显的依赖关系. 显然, 这一附加光程差也是非互易的. 通过改变光轴的方向就可以改变这一相差的符号.

二向相差效应有望用于消除或修正上述 2)、4) 项主要影响因素. 光纤陀螺采用的是 Sagnac 干涉体系. Sagnac 干涉体系的特点是光沿两个相反方向通过同一光路. 如果在光纤陀螺的光路中置入一适当的光折变晶体, 选择适当的物理条件 (包括晶体厚度、光轴方位等), 可以产生一定大小和适当符号的附加光程差, 从而减小或消除光纤中的非互易相移. 也就是说, 利用光折变晶体的二向相差效应所产生的附加位相差就有可能消除或补偿光纤中的双折射现象引起的非互易的相移, 同时也可以消除或补偿其它非线性效应引起光束非互易的相移, 从而达到消除或减弱主要影响因素, 提高光纤陀螺灵敏度的目的.

总之, 本文提出的关于利用光折变晶体的光折变效应来补偿光纤陀螺中各种因素产生的非互易相差从而达到提高光纤陀螺的灵敏度的目的的设想, 尚需实验来验证. 也许, 这将是一种有效的途径.

参考文献:

- [1] 徐泽善, 胡爱民. 传感器与压电器件[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999. 243, 289-291.
- [2] 吴震. 光干涉测量技术[M]. 北京: 中国计量出版社, 1995. 504-503.
- [3] 李志能. 现代光学系统原理[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1994. 480-489.
- [4] 廖延彪. 光纤光学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000. 176-177, 193, 244.
- [5] 郭凤珍, 于长泰. 光纤传感技术与应用[M]. 浙江: 浙江大学出版社, 1992. 108-112.
- [6] 郑光昭, 苏成悦. 光折变晶体 KNSBN 的光折变晶体[J]. 内蒙古工业大学学报, 1998, 17(4): 113-116.
- [7] 郑光昭. 光折变晶体中相反通光方向光程差异的观察[J]. 广东工业大学学报, 2003, 20(4): 5-10.

Improving the Sensitivity of Fiber-optic Gyroscope by Using Photorefractive Crystal

ZHENG Guang-zhao

(Faculty of Information Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Fiber-optic gyroscope is a new kind of inertial device. It has the highest theoretic sensitivity. But at present, its actual sensitivity is far less than the theoretic sensitivity. The main cause is: there are Rayleigh scattering, birefringence phenomenon and other nonlinear effects, such as Kerr effect, in optical fibers. They will cause nonreciprocal phase shifts of beams. This paper proposes to compensate such nonreciprocal phase errors by using photorefractive crystal, a new kind of nonlinear optical material, that is, using its thermal lens effect to weaken or eliminate the influence of Rayleigh scattering, using its bilateral phase effect to eliminate or correct the influence of birefringence phenomenon and Kerr effect, and then to improve the sensitivity of fiber-optic gyroscope.

Key words: fiber-optic gyroscope; sensitivity; photorefractive crystal; photorefractive effects

(上接第 21 页)

Characteristics of Thiobacillus Ferrooxidans and Its Applications in Environmental Engineering

WU Hua-ping, YUAN Bin, BAI Shu-li

(Faculty of Environmental Science & Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510090, China)

Abstract: This paper briefly introduces the characteristics of Thiobacillus ferrooxidans and the mechanism of oxidation of ferrous by Thiobacillus ferrooxidans. Its applications in environmental engineering is summarized.

Key words: ferrous biooxidation; Thiobacillus ferrooxidans; environmental engineering