

打破圆偏振光纤环形腔激光陀螺中闭锁的新方法

洪蕾^{1,2,3}, 苏觉^{1,2,3}, 杨利^{1,2,3}, 钱景仁^{1,2,3}

1. 中国科技大学电子工程与信息科学系光波实验室, 安徽合肥 230027;
2. 安徽省光电子科学与技术重点实验室, 安徽合肥 230027;
3. 中国科学院电磁空间信息重点实验室, 安徽合肥 230027)

摘要:利用琼斯矩阵方法,证明了在光纤圆偏振激光陀螺系统中引入法拉第磁光介质后,双向激光的偏振态依然是正交圆偏振态,仅仅引入了非互易相位;得到了引入非互易相位后,陀螺的两束激光频差和陀螺转速动态关系的解析表达式;给出了需引入的最小非互易相位与后向散射耦合系数之间的关系表达式.分析表明,引入法拉第磁光介质后,既保持了对空间烧孔效应的抑制,又避免了由后向散射引起的闭锁效应,从而为无闭锁光纤环形腔激光陀螺的实现提供了新的理论方法.

关键词:闭锁效应;圆偏振光;法拉第效应;光纤激光陀螺;后向散射

中图分类号: TN242 **文献标识码:** A doi:10.3969/j.issn.0253-2778.2015.01.004

引用格式: Hong Lei, Su Jue, Yang Li, et al. Theoretical analysis of Unlocked Circular polarized erbium-doped fiber ring laser gyroscope based on Faraday effect[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2015,45(1):23-26.

洪蕾,苏觉,杨利,等.打破圆偏振光纤环形腔激光陀螺中闭锁的新方法[J].中国科学技术大学学报,2015,45(1):23-26.

Theoretical analysis of Unlocked Circular polarized erbium-doped fiber ring laser gyroscope based on Faraday effect

HONG Lei^{1,2,3}, SU Jue^{1,2,3}, YANG Li^{1,2,3}, QIAN Jingren^{1,2,3}

1. Department of Electronic Engineering and Information Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China;
2. Anhui Key Laboratory Optoelectronic Science and Technology, Hefei 230027, China;
3. Key Laboratory of Electromagnetic Space Information, Chinese Academy of Science, Hefei 230027, China)

Abstract: Faraday medium was introduced into circular polarized erbium-doped fiber ring laser gyroscope to break the frequency-locked phenomenon. Using Jones matrix, the polarization of Eigen polarization of the laser was proposed. Compared with the laser without Faraday medium, the polarization has not changed. Meanwhile, the parsing expression of the output signal of the gyro was deduced, which indicated that the unlocked fiber ring laser gyroscope can be realized due to the introduction of the Faraday effect.

Key words: frequency-locked; circular polarization; Faraday effect; fiber laser gyro; backscattering

收稿日期:2014-04-24;修回日期:2014-07-29

基金项目:国家自然科学基金(61205028)资助.

作者简介:洪蕾,女,1984年生,博士生.研究方向:光纤技术. E-mail:hongleil@mailustc.edu.cn

通讯作者:苏觉,博士/讲师. E-mail:sjue@ustc.edu.cn

0 引言

掺铒光纤环形腔激光陀螺^[1]是一种有源光纤环形谐振腔陀螺,通过测量掺铒光纤环形腔在顺、逆时针两个方向上的激光频差直接获取角速度信息.因其具有简单易读、全固态结构和高可靠性、易于加工等特点,近年来受到广泛关注.由于掺铒光纤中存在空间烧孔现象^[2-3]以及光纤环形腔中的后向散射^[4-5]引发频率闭锁效应,阻碍了掺铒光纤环形腔激光陀螺在高精度领域的应用.

中国科学技术大学光波实验室设计了圆偏振掺铒光纤环形腔激光器,并初步探讨了这种激光器在陀螺中的应用^[6].激光器中运行两束方向相反、旋向相同的圆偏振光.由于圆偏振光的特殊性质,能够有效抑制掺铒光纤环形腔激光器中的空间烧孔现象,但陀螺中依然存在闭锁现象,这主要是由于后向散射引起的^[7].

为了打破圆偏振掺铒光纤环形腔激光陀螺中由后向散射引起的频率闭锁,本文提出了在环形腔中引入法拉第磁光介质的新方法.理论上分析了加入法拉第磁光介质后,激光器的本征偏振态以及该激光器用于陀螺时,两束激光频差和陀螺转速动态关系的解析表达式.最后对不同情况下陀螺的工作曲线以及最小非互易相位进行了数值模拟与分析.

1 激光器的本征偏振态

掺铒光纤环形腔激光陀螺的敏感元件为圆偏振掺铒光纤环形腔激光器,图 1 是圆偏振掺铒光纤环形腔激光器的示意图.激光器内主要包含掺铒光纤、双向圆起偏器、圆保偏光纤和法拉第磁光介质.当不含法拉第磁光介质时,该激光器 cw 和 ccw 方向上的本征偏振态为传输方向相反、旋向相同的圆偏振

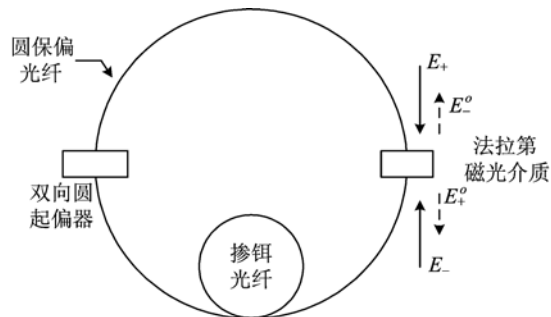


图 1 圆偏振光纤环形腔激光器简略示意图

Fig. 1 The diagram of circular polarized fiber ring laser

态^[6].不失一般性,可以假设此时双向激光都为右旋圆偏振光,其电场的琼斯矩阵分别为:

$$E_+ = \begin{bmatrix} 1 \\ j \end{bmatrix},$$

$$E_- = \begin{bmatrix} 1 \\ -j \end{bmatrix}.$$

下标+表示沿 cw 方向,-表示沿 ccw 方向.

在环形腔内插入法拉第磁光介质后,激光通过法拉第磁光介质,电场矢量会发生旋转,可设电场矢量旋转角度为 ϕ_1 (单位为度).根据琼斯矩阵方法^[8]可知,法拉第磁光介质沿 cw 和 ccw 方向的传输矩阵分别为:

$$T_+ = e^{-j\theta} \begin{bmatrix} \cos \phi_1 & -\sin \phi_1 \\ \sin \phi_1 & \cos \phi_1 \end{bmatrix},$$

$$T_- = e^{-j\theta} \begin{bmatrix} \cos \phi_1 & -\sin \phi_1 \\ \sin \phi_1 & \cos \phi_1 \end{bmatrix}.$$

其中, θ 为法拉第磁光介质的厚度引入的互易相位延迟.

因此经过法拉第磁光介质后,激光的琼斯矩阵 E_+^o 和 E_-^o 分别为:

$$E_+^o = T_+ \cdot E_+ = \begin{bmatrix} 1 \\ j \end{bmatrix} e^{-j\phi_1} e^{-j\theta}$$

$$E_-^o = T_- \cdot E_- = \begin{bmatrix} 1 \\ -j \end{bmatrix} e^{j\phi_1} e^{-j\theta}$$
(1)

由式(1)可知,在图 1 所示的圆偏振激光器中引入法拉第磁光介质后,双向激光的本征偏振态依然为正交的圆偏振态,依然可以有效抑制有源光纤中的空间烧孔现象.同时,两束光产生了非互易的相位变化 $\pm \phi_1$ (单位:度),相位的改变量绝对值相同,是一个与电矢量的旋转角度成正比的量,符号相反.

2 光纤激光陀螺频差

进一步考虑环形腔中存在后向散射.不失一般性,假设 b 点存在后向散射,如图 2 所示.

环中的增益补偿了环内损耗,维持 cw 和 ccw 方向上幅度分别为 E_+ 和 E_- 的稳定工作.以 $z=0$ 点为 E_+ 和 E_- 所在的参考面.在 $z=0$ 点截面上两束激光的传输方程可写为:

$$\begin{bmatrix} e^{-j(\beta_+ L + \phi/2 + \phi_1)} & S_1 \\ S_2 & e^{-j(\beta_- L - \phi/2 - \phi_1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_+ \\ E_- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_+ \\ E_- \end{bmatrix} \quad (2)$$

$S_2 E_+$ 和 $S_1 E_-$ 分别为参考面上由 E_+ 和 E_- 反射的光.其中, β_+ 和 β_- 分别为光纤环形腔中 cw 方向和

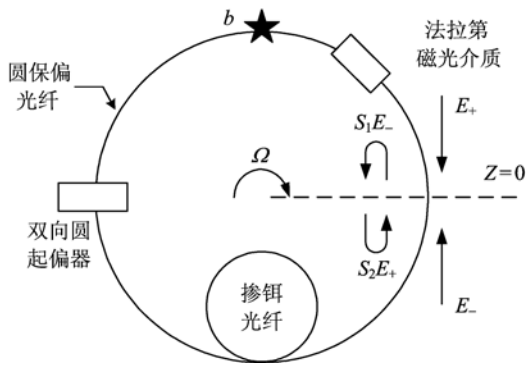


图 2 圆偏振光纤环形腔激光器简略示意图

Fig. 2 The diagram of circular polarized fiber ring laser

ccw方向光的相位常数; ϕ 为陀螺转动引发的 Sagnac 相移:

$$\phi = \frac{4\pi LR}{\lambda C} \Omega = \frac{4\pi R}{\lambda n} \frac{1}{FSR} \Omega.$$

其中, Ω 为转动的角速度, λ 为工作波长, R 为光环路的半径, C 为真空中的光速; L 为环形腔的腔长, n 为光纤折射率, 自由谱宽 $FSR = C/nL$. S_1 和 S_2 分别为顺逆时针两束激光的后向散射系数.

根据激光器的自治条件, 即式(2)存在稳态解的条件是:

$$\begin{vmatrix} e^{-j(\beta_{ccw}l + \phi/2 + \phi_1)} - 1 & S_1 \\ S_2 & e^{-j(\beta_{ccw}l - \phi/2 - \phi_1)} - 1 \end{vmatrix} = 0 \quad (3)$$

由此推出:

$$(e^{-j(\beta + \phi/2 + \phi_1)} - 1)(e^{-j(\beta - \phi/2 - \phi_1)} - 1) - S_1 \cdot S_2 = 0.$$

由后向散射总体效果的分析可知^[7], S_1 和 S_2 为负实数, 即 $S_1 \cdot S_2$ 为正实数. 令

$$S_1 \cdot S_2 = a^2,$$

可得

$$(1 - a^2)x^2 - 2\cos(\phi/2 + \phi_1)x + 1 = 0 \quad (4)$$

式中,

$$x = \sqrt{1 - a^2} e^{i\Psi} \quad (5)$$

其中,

$$\Psi = \arccos \left[\frac{\cos(\phi/2 + \phi_1)}{\sqrt{1 - a^2}} \right] = \arcsin \left[\frac{\sqrt{\sin^2(\phi/2 + \phi_1) - a^2}}{\sqrt{1 - a^2}} \right].$$

由于光纤中的后向散射较小, $a \ll 1$, 有 $\sqrt{1 - a^2} \approx 1$. 推出:

$$\beta_{\pm} l = 2m\pi \pm \arcsin \left[\frac{\sqrt{\sin^2(\phi/2 + \phi_1) - a^2}}{\sqrt{1 - a^2}} \right] \quad (6)$$

从式(6)可以得出, 激光器用于陀螺工作时, cw 和 ccw 方向输出的激光频差 Δf 为:

$$\Delta f = \frac{FSR}{\pi} \arcsin \left[\frac{\sqrt{\sin^2(\phi/2 + \phi_1) - a^2}}{\sqrt{1 - a^2}} \right] \quad (7)$$

3 数值模拟与分析

式(7)表征了引入法拉第磁光介质后, 圆偏振光纤环形腔激光陀螺工作的解析表达式. 此时, 两方向激光的频差 Δf 除了与陀螺转动角速度 Ω 有关外, 还与环形腔中法拉第效应引发的非互易相位变化 $\pm \phi_1$ 以及环形腔中后向散射引发的耦合有关.

为此, 我们计算了当 $FSR = 34 \text{ MHz}$, $R = 19 \text{ cm}$, $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$, $a = 0.003$ 时, 在不同非互易相位情况下, Δf 与 Ω 之间的关系, 如图 3 所示.

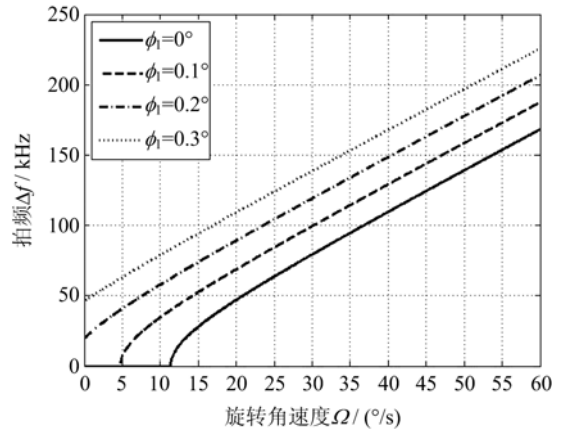


图 3 光纤激光陀螺工作曲线

Fig. 3 The work curve of the erbium-doped fiber ring laser gyroscope

由图 3 可知, 当不引入法拉第磁光介质(即 $\phi_1 = 0^\circ$), 陀螺转动角速度 $\Omega \leq 12^\circ/\text{s}$ 时, $\Delta f = 0$, 此时陀螺工作在闭锁状态, 这是由于后向散射 a 的存在所引起的; 随着 ϕ_1 增大, 闭锁阈值随之减小; 当 $\phi_1 = 0.17^\circ$ 时, 即使在陀螺静止 ($\Omega = 0$) 的情况下, 仍有 $\Delta f \neq 0$ 并且 Δf 与 Ω 有近似线性的关系, 说明此时闭锁状态已被打破.

我们也可以根据式(7)求得不同后向散射系数下, 需引入的最小非互易相位为:

$$\phi_1^{\min} = \frac{180}{\pi} \arcsin a \quad (8)$$

图 4 表明了 ϕ_1^{\min} 与 a 之间的关系曲线. 由图 4 可知, ϕ_1^{\min} 与 a 近似为线性关系. 由于现代商业光纤技术的发展, 即使在有源环形腔内后向散射依然可以保持较低的水平. 因此在圆偏振掺铒光纤环形腔

激光陀螺中,仅需要零点几度到几度的非互易相位即可打破闭锁,有助于光纤激光陀螺的小型化和固体化.

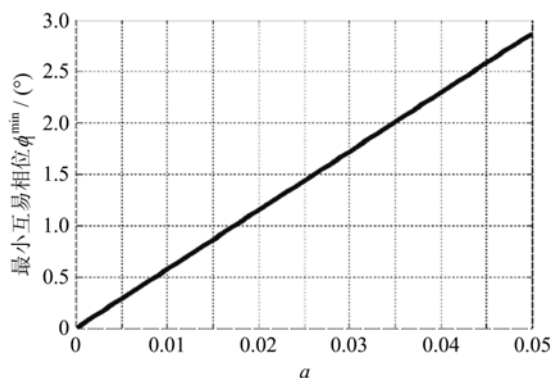


图 4 最小非互易相位与后向散射耦合系数曲线

Fig. 4 Curve of relationship between non reciprocal phase and backscattering coefficient

4 结论

圆偏振光纤激光陀螺中由后向散射引起的闭锁效应可以通过引入法拉第磁光介质加以打破. 理论分析表明,引入法拉第磁光介质后,既保持了圆偏振态激光对空间烧孔效应的抑制,又通过产生固定零偏避免了后向散射引起的闭锁效应,从而为无闭锁掺铒光纤环形腔激光陀螺的进一步实用化提供了理论基础. 通过计算可知,当 $FSR = 34 \text{ MHz}$, $R = 19 \text{ cm}$, $\lambda = 1.55 \text{ }\mu\text{m}$, $a = 0.003$ 时,引入非互易相位大

于 0.17° 时,即可打破圆偏振光纤环形腔激光陀螺中的闭锁效应.

参考文献 (References)

- [1] Kim S K, Kim H K, Kim B Y. Er³⁺-doped fiber ring laser for gyroscope application [J]. Optics Letters, 1994, 19(22): 1 810-1 812.
- [2] Kim H K, Kim S K, Park H G, et al. Polarimetric fiber laser sensors [J]. Optics Letters, 1993, 18(4): 317-319.
- [3] 王许旭. 应用于陀螺的圆偏振双向掺铒光纤环形腔激光器[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2007.
- [4] Sunada S, Inagakiet T S, Harayama T. Ring Laser Gyroscope without lock in phenomenon [J]. Physical Review A, 2008, 78(5): 1-8.
- [5] Schwartz S, Feugnet G, Lariontsev E, et al. Oscillation regimes of a solid-state ring laser with active beat note stabilization: From a chaotic device to a ring laser gyroscopes [J]. Physical Review A, 2007, 76 (2): 23-32.
- [6] 苏觉. 激光型光纤传感器在电流测量和光纤激光陀螺中的应用[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2009.
- [7] Su Jue, Qian Jingren. Lock-in Effect in Fiber Ring Laser Gyros [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(10): 2 487-2 490.
苏觉, 钱景仁. 光纤环形腔激光陀螺中的闭锁效应 [J]. 中国激光, 2010, 37(10): 2 487-2 490.
- [8] 廖延彪. 偏振光学[M]. 北京: 科学出版社, 2003.