

## 异面腔激光陀螺中差分损耗的探讨

杨在富 袁晓东 张 斌 许光明 蒋安国  
(国防科技大学应用物理系,长沙,410073)

**摘要:** 对新一代激光陀螺——异面腔激光陀螺中左、右旋偏振模式间的差分损耗效应进行了理论探讨。这种差分损耗主要是由镜片的 S-P 相位和 Q 的各向异性所引起的,它的存在将直接导致激光陀螺的零漂,从而影响陀螺的性能。

**关键词:** 激光陀螺 S-P 各向异性 差分损耗

### The loss difference in out-of-plane cavity laser gyros

Yang Zaifu, Yuan Xiaodong, Zhang Bin, Xu Guangming, Jiang Anguo

(Department of Applied Physics, National University of  
Defence Technology, Changsha, 410073)

**Abstract:** A magnetic pulse compressor (MPC) was used to provide proper pulse energy and rapid rise time of pulse for magnetic confined discharge circuit. This paper presents the design principle and circuit parameter selection of the magnetic switch and gives the experimental results.

**Key words:** laser gyro S-P anisotropy loss difference

## 引 言

激光陀螺是捷联式惯性导航的理想器件,而四频差动型激光陀螺一般采用平面腔结构。但这种陀螺中的旋光元件(水晶片)会引起损耗和反向散射,这是人们不希望的,特别是当光线不过水晶片光轴时所引起的左、右旋模式间的差分损耗会直接导致激光陀螺的零点漂移<sup>[1]</sup>。为了克服这一困难,国外在 80 年代提出了异面腔结构的激光陀螺,我国也正在把它作为新一代圆偏振光激光陀螺进行研究。我们从反射镜的 S-P 相位和 Q 的各向异性出发,利用光学的 Jones 矢量方法,分析了这种陀螺中的差分损耗效应——顺时针方向(ABCD)的左、右旋本征模式间及顺、逆时针方向的左(或右)旋模式间的差分损耗效应。

### 1 物理模型

异面腔结构激光陀螺的光路如图 1 所示,在图中四个反射镜片的光线入射平面互不平行。设光线偏振方向垂直于镜面 A 的入射面的电场分量为  $E_{SA}$ ,平行于其入射面的电场分量为  $E_{PA}$ ,其

光学 Jones 矢量形式记为  $\begin{bmatrix} E_{PA} \\ E_{SA} \end{bmatrix}$ 。由于镜片 A 与 B 的光线入射面

不平行,所以垂直于镜片 A 入射面的偏振分量并不垂直于镜片 B

的入射面,平行分量亦然。设从镜片 A 到 B 其光线入射面法矢的旋转角为  $\angle_{AB}$ ,则在镜片 B 上的光学 Jones 矢量可以表示成<sup>[2]</sup>:

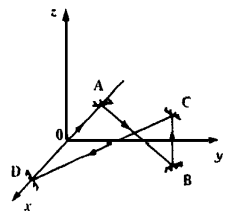


Fig. 1 The out-of-plane laser gyro

$$\begin{bmatrix} E_{PB} \\ E_{SB} \end{bmatrix} = R(AB) \begin{bmatrix} E_{PA} \\ E_{SA} \end{bmatrix} \tag{1}$$

式中,旋转矩阵  $R(AB)$  定义为: 
$$R(AB) = \begin{bmatrix} \cos AB & \sin AB \\ -\sin AB & \cos AB \end{bmatrix} \tag{2}$$

设光线入射角为  $A$  时,镜面 A 对 P,S 偏振光的振幅反射率分别为  $r_{PA}, r_{SA}$ ,反射附加相位分别为  $\varphi_{PA}, \varphi_{SA}$ ,则反射镜本身对光线 Jones 矢量的作用可以用矩阵表示成<sup>[3]</sup>:

$$M_A(A) = \begin{bmatrix} r_{PA}e^{i\varphi_{PA}} & 0 \\ 0 & -r_{SA}e^{i\varphi_{SA}} \end{bmatrix} \tag{3}$$

这样在异面腔环形激光器中光束从 DA 间某一点 T 出发,沿 ABCD 的路径回到 T 点后其 Jones 矢量变为:

$$\begin{bmatrix} E_P \\ E_S \end{bmatrix} = R(DA) M_D(D) R(CD) M_C(C) R(BC) M_B(B) R(AB) M_A(A) \begin{bmatrix} E_P \\ E_S \end{bmatrix} \tag{4}$$

式中,  $BC, CD, DA$  的定义可按  $AB$  的定义类推,  $M_B(B), M_C(C), M_D(D)$  的定义可按  $M_A(A)$  的定义类推。

为了讨论问题方便,在图 1 结构的异面腔环形激光器中以 AD 为 x 轴, AD 中点为原点 O;取 OF 方向为 y 轴, F 为 BC 中点, BC 与 z 轴方向平行,建立直角坐标系。设光路参数  $OA = OD = a, OF = l, FC = FB = b$ ,则在  $Oxyz$  直角坐标系中各有向线段的矢量坐标表示为:

$$\begin{aligned} AB &= (a-l, -b) \\ BC &= (0, 0, 2b) \\ CD &= (a, -l, -b) \end{aligned} \tag{5}$$

$$DA = (-2a, 0, 0)$$

异面腔环形激光器各镜片的入射面法向矢量记为  $a_A, a_B, a_C, a_D$ , 则:

$$\begin{aligned} a_A &= AB \times DA = (0, 2ab, 2al) \\ a_B &= BC \times AB = (-2bl, 2ab, 0) \\ a_C &= CD \times BC = (-2bl, -2ab, 0) \\ a_D &= DA \times CD = (0, -2ab, 2al) \end{aligned} \tag{6}$$

从而可计算出各相邻镜面的光线入射面法矢间夹角  $\theta_{ij} (i, j \in \{A, B, C, D\})$ :

$$\begin{aligned} \theta_{AB} &= \cos^{-1} [(a_A \cdot a_B) / (|a_A| |a_B|)] = \cos^{-1} [ab / (\sqrt{l^2 + a^2} \cdot \sqrt{l^2 + b^2})] \\ \theta_{BC} &= \cos^{-1} [(a_B \cdot a_C) / (|a_B| |a_C|)] = \cos^{-1} [(l^2 - a^2) / (l^2 + a^2)] \\ \theta_{CD} &= \cos^{-1} [(a_C \cdot a_D) / (|a_C| |a_D|)] = \cos^{-1} [ab / (\sqrt{l^2 + b^2} \cdot \sqrt{l^2 + a^2})] \\ \theta_{DA} &= \cos^{-1} [(a_D \cdot a_A) / (|a_D| |a_A|)] = \cos^{-1} [(l^2 - b^2) / (l^2 + b^2)] \end{aligned} \tag{7}$$

设相邻镜面的入射面法矢的旋转角  $\varphi_{ij}$  规定以逆时针为正, 则易知:  $\varphi_{AB} = -\varphi_{BA}, \varphi_{BC} = -\varphi_{CB}, \varphi_{CD} = -\varphi_{DC}, \varphi_{DA} = -\varphi_{AD}$ 。

为了计算差分损耗,我们不考虑激光介质的增益,这样,根据上述可得光线 Jones 矢量从环形腔中 T 点出发沿光路传播一周再回到该点的变换矩阵:

$$\begin{aligned}
A &= \exp(i s) \cdot A \\
&= \exp(i s) \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \\
&= \exp(i s) \begin{bmatrix} \cos_{DA} & \sin_{DA} \\ -\sin_{DA} & \cos_{DA} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{PD}e^{iD} & 0 \\ 0 & -r_{SD} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos_{CD} & \sin_{CD} \\ -\sin_{CD} & \cos_{CD} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{PC}e^{iC} & 0 \\ 0 & -r_{SC} \end{bmatrix} \\
&\quad \begin{bmatrix} \cos_{BC} & \sin_{BC} \\ -\sin_{BC} & \cos_{BC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{PB}e^{iB} & 0 \\ 0 & -r_{SB} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos_{AB} & \sin_{AB} \\ -\sin_{AB} & \cos_{AB} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{PA}e^{iA} & 0 \\ 0 & -r_{SA} \end{bmatrix} \quad (8)
\end{aligned}$$

式中,  $i = p_i - s_i (i = A, B, C, D)$ ,  $s = s_A + s_B + s_C + s_D$ 。

对于本征模(自再现模), 变换矩阵 A 需满足:

$$A \begin{bmatrix} E_{PA} \\ E_{SA} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{PA} \\ E_{SA} \end{bmatrix} \quad (9)$$

上式中, 本征值 一般为复数, 这是因为我们没考虑光场空间渡越的相位延迟。这样, 激光束绕环路一周所受的损耗 可表示为:

$$= 1 - | \quad | ^2 \quad (10)$$

(9) 式仅当  $\text{Det}(A - I) = 0$  时才成立, I 为单位矩阵, 于是得到:

$$\pm = \frac{A_{11} + A_{22} \pm (A_{11} - A_{22})^2 + 4A_{12}A_{21}}{2} \quad (11)$$

其中下标“ $\pm$ ”分别表示左、右旋模式, 代入(10)式, 即可求得左、右旋模式间的差分损耗:

$$= | \quad | ^2 - | \quad | ^2 \quad (12)$$

以上讨论的是顺时针方向(ABCD)左、右旋本征模式间的差分损耗, 对于顺、逆时针方向的左(或右)旋模式间的差分损耗(  $\pm_{\text{顺}} - \pm_{\text{逆}}$ ) 则应如下计算。将(8)式中各矩阵的位置前后调换, 就可以得到光束由 T 点出发, 沿环路逆时针方向运行一周后回到 T 点的总光学变换矩阵, 记为:

$$B = \exp(i s) B = \exp(i s) \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{bmatrix} \quad (13)$$

相应左右旋模式的 本征值记为  $\pm$ , 则顺、逆时针的左(或右)旋模式间的差分损耗可表示为:

$$\pm_{\text{顺}} - \pm_{\text{逆}} = | \quad | ^2 - | \quad | ^2 \quad (14)$$

## 2 分析讨论

先讨论(14)式。对比(8), (13)两式不难发现:  $B_{11} = A_{11}, B_{22} = A_{22}, B_{12} = -A_{21}, B_{21} = -A_{12}$ , 据(11)式知  $\pm = \pm$ , 因此:  $\pm_{\text{顺}} = \pm_{\text{逆}}$  (15)

这也就是说, 镜片的 S-P 各向异性并不造成顺、逆时针方向光束的左(或右)旋模式间的差分损耗。下面分析(12)式。由于矩阵 A 各元素的表达式十分繁杂, 我们只分析几个特例。

特例 1:  $i = 0 (i = A, B, C, D)$  时, A 为实矩阵。据(11)式, 形成椭圆偏振光的条件为:

$$(A_{11} - A_{22})^2 + 4A_{12}A_{21} < 0 \quad (16)$$

在此条件下,  $\pm = \frac{A_{11} + A_{22} \pm \sqrt{(A_{11} - A_{22})^2 - 4A_{12}A_{21}}}{2} \quad (17)$

代入(12)式可得  $= 0$ 。

特例 2:  $r_{Pi} = r_{Si} (i = A, B, C, D)$ 。

在此情况下借助计算机求解可以证明  $= 0$ 。但解析分析十分复杂, 在此不予讨论。

至于更一般的情形,限于篇幅,不再赘述。在此只给出其它情况的部分关系曲线(图 2)以供参考。

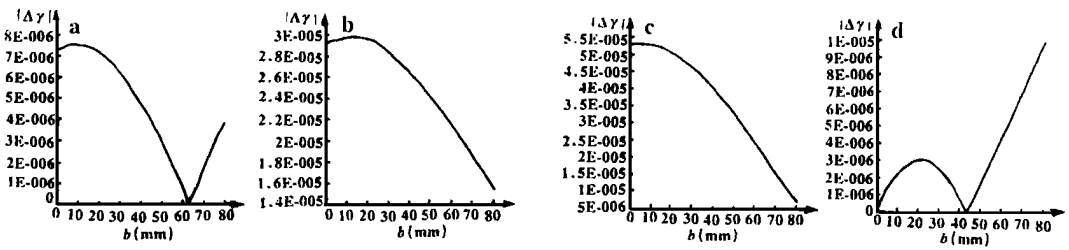


Fig.2 Loss difference  $|\Delta\gamma|$  vs  $b$ . The common parameters are:  $l = 50.0\text{mm}$ ,  $l = 90.0\text{mm}$ ,  $r_{PA} = 0.9995$ ,  $r_{SA} = 0.9998$ ,  $r_{PB} = 0.99995$ ,  $r_{SB} = 0.99998$ ,  $r_{PC} = 0.99996$ ,  $r_{SC} = 0.99998$ ,  $r_{PD} = 0.99997$ ,  $r_{SD} = 0.99999$ . Other parameters are  
 a —  $A = 5^\circ$ ,  $B = 2^\circ$ ,  $C = 3^\circ$ ,  $D = 2.5^\circ$  b —  $A = 5^\circ$ ,  $B = 0$ ,  $C = -5^\circ$ ,  $D = 0$  c —  $A = 5^\circ$ ,  $B = -4^\circ$ ,  $C = -5^\circ$ ,  $D = 4^\circ$  d —  $A = 0$ ,  $B = 0$ ,  $C = 5^\circ$ ,  $D = 5^\circ$

### 3 结 论

通过上述分析可以看出,异面腔激光陀螺中左、右旋本征模式间的差分损耗是由镜片的 S-P 相位和 Q 的各向异性所共同决定的。根据计算结果,我们认为异面腔激光陀螺的实现依赖于真空镀膜 S-P 相位和 Q 各向异性的控制精度。

#### 参 考 文 献

- 1 高伯龙,李树堂. 激光陀螺. 长沙:国防科技大学出版社,1984
- 2 Chow W W, Gea - Banacloche J, Pedrotti L M *et al.* Rev Mod Phys, 1985; 57(1)
- 3 Hecht E, Zajac A. Optics. Addison-Wesley Publishing Company, 1974

作者简介:杨在富,男,1974年9月出生。硕士研究生。现从事激光防护研究。

收稿日期:1998-07-20

#### 简 讯

### 通过氧化工艺集成光探测器和垂直腔半导体激光器

美国加州大学(Santa Barbara, CA)的研究人员制作出集成在同样衬底、无需再次外延生长的垂直腔半导体激光器和光电探测器。单片集成半导体激光器和探测器对于成功实现自由空间光互联是关键的第一步。两个器件集成在一起,其外延结构和材料相同,只是底部腔镜的反射率不同。

这两个器件中有三层厚 8nm 的 AlGaAs 量子阱,底部由分布反馈(DBR)构成反射镜。在探测器中,谐振腔 DBR 结构底部腔镜的反射率由最初生长所决定为 80%。研究人员通过选择 AlGaAs 层的氧化表面而将 BDR 腔镜的反射率提高到 99.3%,这样,才能满足构成垂直腔半导体激光器输出镜的要求。因此,不需要通过重新外延生长而将探测器和垂直腔激光器集成在同一 GaAs 衬底上。探测器的响应度约为 0.43A/W,相应于 56%的光吸收率及 5.9nm 的光学带宽。单模和多模垂直腔激光器的阈值电流分别低于 180μA 和 450μA,斜效率分别为 33%和 60%。

(张贤义 曹三松 供稿)