

环形激光器中的光场偏振度

左 超 袁晓东 曾 淳

(国防科技大学应用物理系, 长沙, 410073)

摘要: 对采用四频差动法偏频的环形激光器中光场偏振度进行了计算和讨论。光场的偏振用圆基坐标下的琼斯矩阵表示。光场的偏振度由反射膜片和水晶片的光学性质决定, 在环形腔中的不同位置处, 光场的偏振度不同。

关键词: 环形激光器 琼斯矩阵 偏振度

Polarization of optical modes in ring lasers

Zuo Chao, Yuan Xiaodong, Zeng Chun

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

Abstract: Degree of polarization of the optical modes in ring lasers are calculated and discussed. Polarization of the optical modes is expressed by Jones matrix under circular coordinate. Degree of polarization of the optical modes, which is decided by the optical property of the thin film and the crystal, depends on the optical modes' positions in ring cavity.

Key words: ring laser Jones matrix polarization

引 言

采用四频差动法偏频的环形激光器与普通偏置的环形激光器相比, 具有偏频量大、无锁区误差、偏频稳定性好等优点^[1]。四频差动的基本原理是在环形腔内激发两组圆偏振的光信号, 利用水晶片的旋光性将其区分为左旋一对模和右旋一对模, 再利用磁旋光元件的磁光效应, 对每一对模产生频率分裂。输出中四个频率的光信号经光电转换形成差动频差信号而将偏置去掉^[2]。保持光信号为百分之百的圆偏振光对输出频差的影响最小, 相反, 光信号存在一定的偏振度将对输出频差信号有影响。我们以环形激光器的结构为物理模型(如图 1 所示), 计算环形腔内各点(a~d 点)的光场偏振度, 计算方法为: 采用圆基坐标下的琼斯矩阵, 偏振模式自再现满足本征值方程。计算结果将对环形激光器的结构设计有指导意义。

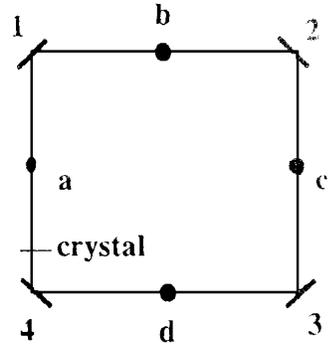


Fig. 1 Configuration of ring lasers
1~4—high reflective thin films

1 环形腔中的光场偏振模式

1.1 光场及各光学元件在圆基坐标下的琼斯矩阵

此时,任一光场偏振态的琼斯矩阵为 $\begin{pmatrix} E_l \\ E_r \end{pmatrix}$, E_l 和 E_r 分别代表椭圆偏振态的左旋分量和

右旋分量,偏振度 $\varepsilon = \frac{2|E_l||E_r|}{|E_l|^2 + |E_r|^2}$ (1)

采用圆基坐标简化了偏振度的计算,避免了直角坐标中偏振度的计算所需的坐标旋转。

在直角坐标中,高反膜的琼斯矩阵为 $\begin{pmatrix} r_P e^{j\delta_P} & 0 \\ 0 & r_S e^{j\delta_S} \end{pmatrix}$ [3], r_P, r_S 为 P 和 S 方向上的振幅反射

率, δ_P 和 δ_S 则为反射相移,经坐标变换,在圆基坐标中的琼斯矩阵为 $F^{-1} \begin{pmatrix} r_P e^{j\delta_P} & 0 \\ 0 & r_S e^{j\delta_S} \end{pmatrix} F$,

其中, $F = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ -j & j \end{pmatrix}$, j 指复数的虚部。水晶片的琼斯矩阵为 $F^{-1} \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\cos\theta & \sin\theta \end{pmatrix} F$ 。由于磁光元件的旋光角只有水晶片旋光角的 10^{-3} ,其琼斯矩阵近似为单位阵,因此,它对光场偏振度的影响可忽略。

1.2 环形腔中 a 处的本征模式

1.2.1 顺时针传播模式(CW波) 从 a 点出发绕环路一周的琼斯矩阵为:

$$F^{-1} \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_{P_4} e^{j\delta_{P_4}} & 0 \\ 0 & r_{S_4} e^{j\delta_{S_4}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_{P_3} e^{j\delta_{P_3}} & 0 \\ 0 & r_{S_3} e^{j\delta_{S_3}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_{P_2} e^{j\delta_{P_2}} & 0 \\ 0 & r_{S_2} e^{j\delta_{S_2}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_{P_1} e^{j\delta_{P_1}} & 0 \\ 0 & r_{S_1} e^{j\delta_{S_1}} \end{pmatrix} F$$

$$= e^{j\delta_s} \begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{pmatrix}$$

下标 P_i, S_i ($i = 1, 2, 3, 4$) 代表各膜片的 P 和 S 方向。记传递矩阵

$$M = \begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{pmatrix}, \text{ 其中, } M_{11} = (r_P e^{j\delta} \cos\theta - j r_P e^{j\delta} \sin\theta - j r_S \sin\theta + r_S \cos\theta) / 2 \quad (2)$$

$$M_{12} = (r_P e^{j\delta} \cos\theta - j r_P e^{j\delta} \sin\theta + j r_S \sin\theta - r_S \cos\theta) / 2 \quad (3)$$

$$M_{21} = (r_P e^{j\delta} \cos\theta + j r_P e^{j\delta} \sin\theta - j r_S \sin\theta - r_S \cos\theta) / 2 \quad (4)$$

$$M_{22} = (r_P e^{j\delta} \cos\theta + j r_P e^{j\delta} \sin\theta + j r_S \sin\theta + r_S \cos\theta) / 2 \quad (5)$$

$$\delta_s = \delta_{S_1} + \delta_{S_2} + \delta_{S_3} + \delta_{S_4}, r_S = r_{S_1} \cdot r_{S_2} \cdot r_{S_3} \cdot r_{S_4}, r_P = r_{P_1} \cdot r_{P_2} \cdot r_{P_3} \cdot r_{P_4}, \delta = \delta_{P_1} + \delta_{P_2} + \delta_{P_3} + \delta_{P_4} - \delta_{S_1} - \delta_{S_2} - \delta_{S_3} - \delta_{S_4}$$

光场模式自再现要求传递矩阵 M 满足: $M \begin{pmatrix} E_l \\ E_r \end{pmatrix} = \lambda \begin{pmatrix} E_l \\ E_r \end{pmatrix}$, $\begin{pmatrix} E_l \\ E_r \end{pmatrix}$ 为 a 点的偏振琼斯矩阵。

解得本征值

$$\lambda = [M_{11} + M_{22} - \sqrt{(M_{11} - M_{22})^2 + 4M_{12}M_{21}}] / 2,$$

$$\lambda = [M_{11} + M_{22} + \sqrt{(M_{11} - M_{22})^2 + 4M_{12}M_{21}}] / 2$$

λ 对应的本征矢量为 $\begin{pmatrix} \lambda - M_{22} \\ M_{21} \end{pmatrix}$, λ 对应的本征值矢量为 $\begin{pmatrix} M_{12} \\ \lambda - M_{11} \end{pmatrix}$ 。

1.2.2 逆时针传播模式(CCW波) 仍旧从 a 点出发,与 CW 波的不同之处在于:(1)各矩阵

乘的顺序变化。(2) 水晶片这种自然旋光晶体对 CCW 波的旋光角由 θ 变为 $-\theta$ 。同样计算可得 λ'_l 及 λ'_r 。可以证明: CCW 波的本征值 λ'_l 和 λ'_r 等于 CW 波的 λ_l 和 λ_r , 这是因为 CCW 波的光学传递矩阵 M' 的各元素 $M_{11}', M_{12}', M_{21}', M_{22}'$ 与 M 的各元素存在下述关系:

$$M_{11}' = M_{22}, M_{22}' = M_{11}, M_{12}' = M_{12}, M_{21}' = M_{21} \quad (6)$$

1.2.3 环形腔中 a 处的四个本征模式 由偏振度的(1)式和传递矩阵各元素的(2)~(5)式, 可以证明在 a 处 4 个本征模式(表 1)的偏振度相等, 即:

$$\epsilon_{\text{cwl}} = \epsilon_{\text{cwr}} = \epsilon_{\text{ccwl}} = \epsilon_{\text{ccwr}} = \frac{2 |M_{12}| |\lambda_r - M_{11}|}{|M_{12}|^2 + |\lambda_r - M_{11}|^2}$$

Table 1 Four polarized eigen-modes in ring lasers

optical model	CW		CCW	
eigen-value	λ_r	λ_l	λ'_r	λ'_l
eigen-vector	$\begin{pmatrix} M_{12} \\ \lambda_r - M_{11} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \lambda_r - M_{22} \\ M_{21} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} M_{12}' \\ \lambda'_r - M_{11}' \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \lambda'_l - M_{22}' \\ M_{21}' \end{pmatrix}$
direction of rotation	right	left	right	left
degree of polarization	ϵ_{cwr}	ϵ_{cwl}	ϵ_{ccwr}	ϵ_{ccwl}

1.2.4 讨论 (1) 形成圆偏振光的条件: 由表 1 可知, 满足 $|M_{12}| = |M_{21}| = 0$, 且 $|\lambda_r - M_{11}| \neq 0$, $|\lambda_r - M_{22}| \neq 0$, 即 4 个膜片的反射相差 $\delta_P - \delta_S$ 的和为 0, 振幅反射率比值 r_P/r_S 的积为 1, 且旋光角不为 π 的整数倍时, 环形腔内可形成完全圆偏振光。(2) 形成线偏振光的条件: $|M_{12}| = |\lambda_r - M_{11}|$, $|M_{12}| = |\lambda_r - M_{22}|$, 即 $\theta = k\pi$, $k = 0, 1, 2, \dots$, 水晶片的旋光角为 π 的整数倍, 其偏振方向在 S, P 方向。(3) 膜片和水晶片对光场偏振度的影响: 由以上的计算可知, 环形腔内的光场偏振度由膜片的反射相差 $\delta_P - \delta_S$ 和振幅反射率比值 r_P/r_S 以及水晶片的旋光角 θ 决定。当单个膜片的反射相差在 $-2^\circ \sim 2^\circ$ 内变化时(其余膜片反射相差均为 0, 所有膜片的振幅反射率比值为 1, 旋光角为 90°), a 处偏振度的变化如图 2 所示。

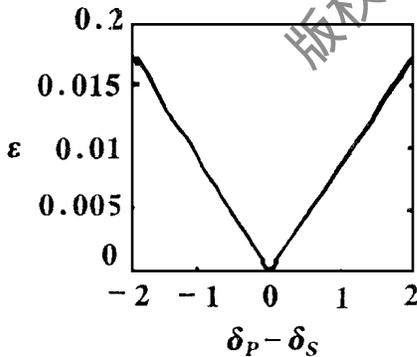


Fig. 2 Phase shift upon reflection of certain single thin film leads to degree of polarization shift at position a

计算表明, 膜片的振幅反射率比值和旋光角的变化也造成 a 处光场偏振度的变化, 其中, 影响最大的是膜片反射相差的变化。

1.3 环形腔中其余各点的光场偏振度

采用同样的方法, 可得 b~d 各点的光场偏振度, 结果为: 在 b, c, d 处, (6) 式仍然成立, 但 4 个模式的偏振度不同, 大量的数值计算表明, 在上述各点, 左旋一对模的偏振度相等, 右旋一对模的偏振度相等。4 个本征模式偏振度相等的条件为: $\theta = 90^\circ$ 或各膜片的振幅反射率比值均为 1, 反射相差均为 0, 当满足后一条件, 且 θ 不是 π 的整数倍时, 形成 4 个圆偏振光。数值计算的例子: 取 $\theta = 89^\circ$, 膜片 1 的反射相差为

2.1° , 振幅反射率比值为 0.998, 2~4 膜片的相应数据为 $1.9^\circ, 0.97; -0.3^\circ, 0.89; 1.1^\circ, 0.95$ 。计算结果如表 2 所示。

Table 2 Degree of polarization of eigen-modes at different positions of ring lasers

degree of polarization	ϵ_{cwr}	ϵ_{cwl}	ϵ_{ccwr}	ϵ_{ccwl}
a	0.108175	0.108175	0.108175	0.108175
b	0.098617	0.097349	0.098617	0.097349
c	0.074449	0.071768	0.074449	0.071768
d	0.053920	0.053777	0.053920	0.053777

2 讨 论

由以上的计算可知, 环形腔中的增益区处于不同位置时, 增益区内光场偏振度也不相同。光场与增益区原子相互作用的结果, 使得光场偏振度的差值及其变化对环形激光器的输出频差信号有影响, 这将对环形激光器的零漂^[1]有贡献。

当把增益区置于 a 处时, 4 个本征模式的偏振度相等, 这种相等不受膜片和水晶片的影响, 因此, 消除了由光场偏振度不等造成的零漂。当把增益区置于 b, c, d 处时, 光场模式的偏振度不等, 零漂项中包含光场偏振度不等带来的影响。

由形成圆偏振光的条件可知: 在 b, c, d 处, 保持圆偏振光对膜片的要求高于对 a 处的要求, 因此, 把增益区置于 a 处有利于减小零漂, 可降低对反射膜片的工艺要求。

3 结 论

环形腔中的 4 个本征模式的偏振度随它们在腔中的不同位置而变化, 在 a 处, 4 个模式的偏振度相等, 而在其余位置, 4 个模式的偏振度不等(相同旋向模式的偏振度相等)。为了将由光场偏振度带来的零漂减至最小, 需采取以下措施: 增益区置于 a 处, 保持 4 个反射膜的反射相差的和为 0、振幅反射率比值的积为 1, 且旋光角不是 π 的整数倍。

参 考 文 献

- 1 高伯龙, 李树棠. 激光陀螺. 长沙: 国防科技大学出版社, 1984
- 2 姜亚男. 环形激光陀螺. 北京: 清华大学出版社, 1985
- 3 魏光辉. 矩阵光学. 北京: 兵器工业出版社, 1995
- 4 阿查姆 R M A, 巴夏拉 N M 著, 梁民基, 尹树百, 张福初 *et al* 译. 椭圆偏振测量术和偏振光. 北京: 科学出版社, 1986

作者简介: 左 超, 男, 1972 年 3 月出生。助工。目前正从事激光陀螺的研究课题。

袁晓东, 男, 1964 年 1 月出生。副教授。长期从事激光陀螺、激光技术的研究。

曾 淳, 男, 1957 年 6 月出生。教授。长期从事激光陀螺、光学薄膜、光学加工等技术研究。

收稿日期: 1998-10-30