

四频差动激光陀螺差分偏振损耗研究

党敏*, 于文东, 胡强, 陈林峰

航空工业西安飞行自动控制研究所, 陕西 西安 710065

摘要 差分偏振损耗所导致的零偏直接影响四频差动激光陀螺性能。基于此,提出一种通过优化反射镜配置参数来有效减小差分偏振损耗的方法。基于琼斯矩阵,通过求解自洽方程,数值分析了四频差动激光陀螺反射镜参数及非共面折叠角对差分偏振损耗的影响,讨论确定了反射镜的较优参数配置。数值计算结果表明,反射镜反射相移对差分偏振损耗影响最为显著。当 4 个反射镜反射相移和为 0 且正负反射相移互相抵消时,差分偏振损耗为 0,这对减小差分偏振损耗的工程化应用具有重要参考意义。

关键词 激光光学; 四频差动激光陀螺; 差分偏振损耗; 反射镜; 反射相移

中图分类号 V241.5+58

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.031405

Reducing Differential Polarization Loss in Four-Frequency Differential Laser Gyroscope

Dang Min*, Yu Wendong, Hu qiang, Chen Linfeng

AVIC Xi'an Flight Automatic Control Research Institution, Xi'an, Shaanxi 710065, China

Abstract The bias caused by differential polarization loss directly affects the performance of four-frequency differential laser gyroscopes. This study proposes an optimization method for the configurable parameters of mirrors, and effectively reduces the differential polarization loss. Based on the Jones matrices, the self-consistent equation is numerically solved, obtaining the influences of the mirror parameters and the non-coplanar folding angle of the four-frequency differential laser gyroscope on the differential polarization loss. The mirror configurations are then improved. In the numerical calculations, the differential polarization loss is most affected by the reflection-induced retardance of the mirror. When the sum of the reflection-induced retardances of four mirrors is 0 and the positive and negative reflection-induced retardances of four mirrors can wipe one another out, the differential polarization loss is 0. This technique will be valuable for reducing the differential polarization loss in engineering applications.

Key words laser optics; four-frequency differential laser gyroscope; differential polarization loss; mirror; reflection-induced retardance

OCIS codes 140.3370; 230.4040; 260.5430

1 引言

激光陀螺作为新一代捷联惯性导航器件,与传统机电陀螺相比,具有启动迅速、动态范围宽、标度因数线性度高,抗振动冲击能力强等优点,被广泛应用于航空、航天、航海及导弹等领域^[1-2]。四频差动激光陀螺作为激光陀螺第二代产品,采用非共面腔技术产生互易频率分裂,采用法拉第室产生非互易

频率分裂,克服了二频机械抖动激光陀螺的不足,实现了全固态、不频繁过锁,且随机游走系数更小,比例因子线性度更高,具有良好的应用前景^[3-4]。由于四频差动激光陀螺谐振腔内同时有四个激光模式在工作,每个模式的频率、增益、损耗都不尽相同,这会使陀螺中产生增益介质色散误差,进而产生陀螺零偏,且零偏随温度的变化而改变,严重影响四频差动激光陀螺的性能。增益介质色散引起

收稿日期: 2019-07-19; 修回日期: 2019-07-31; 录用日期: 2019-08-12

基金项目: 国家十三五预研资助项目(41417010202)

* E-mail: stumy@163.com

的零偏取决于平均损耗、三类差分损耗、等离子体上的纵向磁场以及相对中心频率失谐量,其中差分损耗是最主要的误差源之一,降低陀螺零偏及其变化根本上是降低差分损耗^[2]。因此,研究差分损耗对提高四频差动激光陀螺精度具有重要意义。国外对差分损耗特性的研究报道很少^[2],国内研究仅理论探讨了由镜片 s-p 相位、水晶片各向异性及光束不过水晶片光轴等因素所引起的左右旋偏振模式间的差分偏振损耗(DPL)^[5-6]。基于此,本文主要采用琼斯矩阵自洽方法^[7-8],分析反射镜参数和非共面折叠角对差分偏振损耗的影响,提出一种反射镜配套参数控制方法,为消除差分偏振损耗这项误差提供了一种实用的技术手段。

2 差分偏振损耗计算

2.1 琼斯矩阵

四频差动激光陀螺结构示意图如图 1 所示, R_1, R_2, R_3 和 R_4 为反射镜, L_1, L_2, L_3 和 L_4 为反射镜之间的直线光路, θ 为光路非共面折叠角。实际中,考虑到谐振腔加工工艺性,一般设计谐振腔四条边相等,因此本文计算中只考虑 L_1, L_2, L_3 和 L_4 相等的情况。

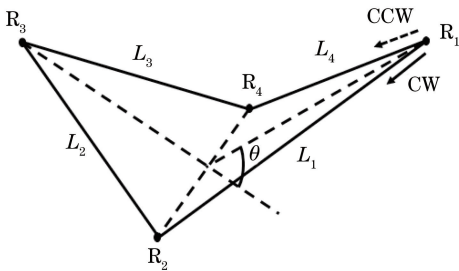


图 1 四频差动激光陀螺结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of four-frequency differential laser gyroscope

为了便于分析非共面谐振腔内振荡模式的偏振及损耗特性,下面给出各线性光学元件的琼斯矩阵表达式。

1) 反射镜反射矩阵

实际的反射镜一般具有非理想反射特性。反射镜对光束 s 偏振态和 p 偏振态的反射率、相位不同。一般反射镜的反射矩阵^[9]可表示为

$$\mathbf{R}(r_s, r_p, \Delta) = \begin{bmatrix} r_s \exp\left(i \frac{\Delta}{2}\right) & 0 \\ 0 & r_p \exp\left(-i \frac{\Delta}{2}\right) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中: r_s 和 r_p 分别为反射镜的 s 态和 p 态的反射率, Δ 为反射镜 s 态和 p 态的反射相移。当光由光疏介质入射至光密介质,且入射角小于布鲁斯特角时,反射镜 s 态和 p 态的反射相移为 π ,未计入 Δ 中。

2) 像旋转矩阵

非共面谐振腔的相邻反射镜的法线不共面会导致像旋转,像旋转可等效为坐标系旋转引起的光束矢量旋转。根据几何算法,像转角计算公式^[10]为

$$\rho = \arccos[\cos^2(\theta/2)], \quad (2)$$

式中: θ 为谐振腔光路的非共面折叠角, ρ 为像转角。

像旋转矩阵可表示为

$$\mathbf{S}(\rho) = \begin{bmatrix} \cos \rho & \sin \rho \\ -\sin \rho & \cos \rho \end{bmatrix}. \quad (3)$$

2.2 自洽方程及差分偏振损耗

从谐振腔中某一位置开始,通过上述基本琼斯矩阵的逆序连乘得到环绕谐振腔一周的非共面谐振腔整体琼斯矩阵,进而利用自洽方程计算出该位置处光的偏振态及损耗。不考虑增益介质,如图 1 所示,从反射镜 R_1 开始顺时针方向的非共面谐振腔的整体琼斯矩阵为

$$\mathbf{Q}_{cw} = \mathbf{S}(\rho_4) \mathbf{R}(r_{s4}, r_{p4}, \Delta_4) \mathbf{S}(\rho_3) \mathbf{R}(r_{s3}, r_{p3}, \Delta_3) \times \mathbf{S}(\rho_2) \mathbf{R}(r_{s2}, r_{p2}, \Delta_2) \mathbf{S}(\rho_1) \mathbf{R}(r_{s1}, r_{p1}, \Delta_1). \quad (4)$$

式中: $\rho_4, \rho_3, \rho_2, \rho_1$ 分别为经过反射镜 R_4, R_3, R_2, R_1 反射后产生的像转角, $r_{s4}, r_{s3}, r_{s2}, r_{s1}$ 分别为反射镜 R_4, R_3, R_2, R_1 的 s 态反射率, $r_{p4}, r_{p3}, r_{p2}, r_{p1}$ 分别为反射镜 R_4, R_3, R_2, R_1 的 p 态反射率, $\Delta_4, \Delta_3, \Delta_2, \Delta_1$ 分别为反射镜 R_4, R_3, R_2, R_1 的 s 态和 p 态的反射相移。

从反射镜 R_1 开始逆时针方向的非共面谐振腔的整体琼斯矩阵为

$$\mathbf{Q}_{ccw} = \mathbf{R}(r_{s1}, r_{p1}, \Delta_1) \mathbf{S}(\rho_1) \mathbf{R}(r_{s2}, r_{p2}, \Delta_2) \mathbf{S}(\rho_2) \times \mathbf{R}(r_{s3}, r_{p3}, \Delta_3) \mathbf{S}(\rho_3) \mathbf{R}(r_{s4}, r_{p4}, \Delta_4) \mathbf{S}(\rho_4). \quad (5)$$

谐振腔振荡光束环绕谐振腔一周后其偏振态的琼斯矢量必须自再现,即有

$$\mathbf{Q}_{cw} \mathbf{E}_{cw} = \lambda_{cw} \mathbf{E}_{cw}, \quad (6)$$

$$\mathbf{Q}_{ccw} \mathbf{E}_{ccw} = \lambda_{ccw} \mathbf{E}_{ccw}, \quad (7)$$

式中: \mathbf{E}_{cw} 为顺时针光束偏振态的琼斯矢量,即 \mathbf{Q}_{cw} 的本征矢量, \mathbf{E}_{ccw} 为逆时针光束的偏振态琼斯矢量,即 \mathbf{Q}_{ccw} 的本征矢量, λ_{cw} 为 \mathbf{Q}_{cw} 的本征值, λ_{ccw} 为 \mathbf{Q}_{ccw} 的本征值。

以顺时针方向的自洽方程为例, \mathbf{Q}_{cw} 矩阵的本征值 λ_{cw} 必须满足

$$\lambda_{cw}^2 - (q_{11} + q_{22})\lambda_{cw} + (q_{11}q_{22} - q_{21}q_{12}) = 0, \quad (8)$$

式中: q_{11} 、 q_{12} 、 q_{21} 和 q_{22} 为整体琼斯矩阵 \mathbf{Q}_{cw} 的元素。则本征值 λ_{cw} 有两个解, 分别为

$$\lambda_{cw_1} = \frac{1}{2} [(q_{11} + q_{22}) + \sqrt{(q_{11} + q_{22})^2 - 4(q_{11}q_{22} - q_{21}q_{12})}], \quad (9)$$

$$\lambda_{cw_2} = \frac{1}{2} [(q_{11} + q_{22}) - \sqrt{(q_{11} + q_{22})^2 - 4(q_{11}q_{22} - q_{21}q_{12})}]. \quad (10)$$

得到本征值 λ_{cw} 后, 容易得到顺时针方向的光波损耗为

$$\delta_{cw_1} = 1 - |\lambda_{cw_1}|^2, \quad (11)$$

$$\delta_{cw_2} = 1 - |\lambda_{cw_2}|^2. \quad (12)$$

进一步需要通过本征矢量 \mathbf{E}_{cw} 确定顺时针方向光波偏振态。

对应于本征值 λ_{cw_1} 和 λ_{cw_2} , 矩阵 \mathbf{Q}_{cw} 的本征矢量 \mathbf{E}_{cw} 也有两个解, 分别为

$$\mathbf{E}_{cw_1} = \begin{bmatrix} E_{cw_1_x} \\ E_{cw_1_y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_{11} - \lambda_{cw_2} \\ q_{21} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (13)$$

$$\mathbf{E}_{cw_2} = \begin{bmatrix} E_{cw_2_x} \\ E_{cw_2_y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_{11} - \lambda_{cw_1} \\ q_{21} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (14)$$

式中: \mathbf{E}_{cw_1} 、 \mathbf{E}_{cw_2} 为本征矢量 \mathbf{E}_{cw} 的两个解, $E_{cw_1_x}$ 、 $E_{cw_1_y}$ 分别为本征矢量 \mathbf{E}_{cw_1} 沿 x 轴和 y 轴的分量, $E_{cw_2_x}$ 、 $E_{cw_2_y}$ 分别为本征矢量 \mathbf{E}_{cw_2} 沿 x 轴和 y 轴的分量。

顺时针方向光波偏振态可通过参数 χ 来确定, 参数 χ 的表达式为

$$\chi_{cw_1} = \frac{E_{cw_1_y}}{E_{cw_1_x}} = \frac{q_{21}}{q_{11} - \lambda_{cw_2}}, \quad (15)$$

$$\chi_{cw_2} = \frac{E_{cw_2_y}}{E_{cw_2_x}} = \frac{q_{21}}{q_{11} - \lambda_{cw_1}}. \quad (16)$$

如果 $\chi = i$, 则光波是右旋圆偏振光, 如果 $\chi = -i$, 则光波是左旋圆偏振光, 其余情况光波为椭圆偏振光。

也可通过同样的方法对逆时针方向自洽方程进行求解, 得到逆时针左、右旋偏振光的损耗。差分偏振损耗是指不同方向的光波中左、右旋偏振光损耗差的和, 表达式为^[2]

$$\delta_{DPL} = \frac{1}{4} (\delta_{cw_L} - \delta_{cw_R} + \delta_{ccw_L} - \delta_{ccw_R}), \quad (17)$$

式中: δ_{cw_L} 为顺时针左旋偏振光损耗, δ_{cw_R} 为顺时针

右旋偏振光损耗, δ_{ccw_L} 为逆时针左旋偏振光损耗, δ_{ccw_R} 为逆时针右旋偏振光损耗。

3 数值分析

3.1 差分偏振损耗计算及分析

为计算反射镜 R_1 处的差分偏振损耗, 需要得到顺时针左旋和右旋偏振光、逆时针左旋和右旋偏振光的损耗。在计算中, 假设 4 个反射镜参数相同, 各参数值分别为 $r_{s1} = r_{s2} = r_{s3} = r_{s4} = r_s = 0.99998$, $r_{p1} = r_{p2} = r_{p3} = r_{p4} = r_p = 0.9998$, $\Delta_1 = \Delta_2 = \Delta_3 = \Delta_4 = \Delta = 2^\circ$, $\theta = 8^\circ$ 。

根据(1)到(17)式及偏振态判定方法, 基于上述谐振腔参数, 数值计算得到差分偏振损耗, 并分析各参数对差分偏振损耗的影响, 计算结果如图 2 所示。

由图 2 可知: 当反射镜 s 态反射率 r_s 与 p 态反射率 r_p 相等时, 差分偏振损耗为 0; 差分偏振损耗绝对值随反射相移 Δ 绝对值的增大而增大, 当反射相移 $\Delta = 0$ 时, 差分偏振损耗为 0; 差分偏振损耗随非共面折叠角 θ 绝对值的增大而减小, 非共面折叠角的有效范围为 $(0, \pi)$ 。

由上述结论可以看出, 为了减小差分偏振损耗, 应使反射镜 s 态和 p 态的反射率相等, 减小 s 态和 p 态的反射相移, 增大非共面折叠角, 其中减小反射镜 s 态和 p 态的反射相移的作用最为明显。

3.2 反射镜配套参数优化

在工程应用中, 增大非共面折叠角会带来比例因子减小、工作模式增益降低等其他问题, 镀制 s 态、 p 态反射率相等, 反射相移为 0 的反射镜也是比较困难的。因此, 考虑通过优化反射镜配套参数, 减小差分偏振损耗。

各个反射镜 s 态、 p 态反射相移相等, 即 $\Delta_1 = \Delta_2 = \Delta_3 = \Delta_4 = \Delta$, 当且仅当每个反射镜反射相移为 0 时, 差分偏振损耗为 0, 如图 2(c) 所示。该反射镜配套参数优化要求将每个反射镜 s 态、 p 态的反射相移控制为 0, 在工程实现中有一定难度。

当各个反射镜 s 态、 p 态反射相移呈正负间隔时, 即 $\Delta_1 = -\Delta_2 = \Delta_3 = -\Delta_4 = \Delta$, $\Delta_1 = -\Delta_2 = n_1\Delta$ 、 $\Delta_3 = -\Delta_4 = n_2\Delta$ ($n_1 \neq n_2$), 以及 $\Delta_1 = -\Delta_4 = n_1\Delta$ 、 $-\Delta_2 = \Delta_3 = n_2\Delta$ ($n_1 \neq n_2$) 三种情况下, 差分偏振损耗均为 0, 结果如图 3(a) 所示, 其中假定 $n_1 = \frac{1}{2}$,

$$n_2 = \frac{3}{2}.$$

当各个反射镜 s 态、 p 态的反射相移正负相邻时,

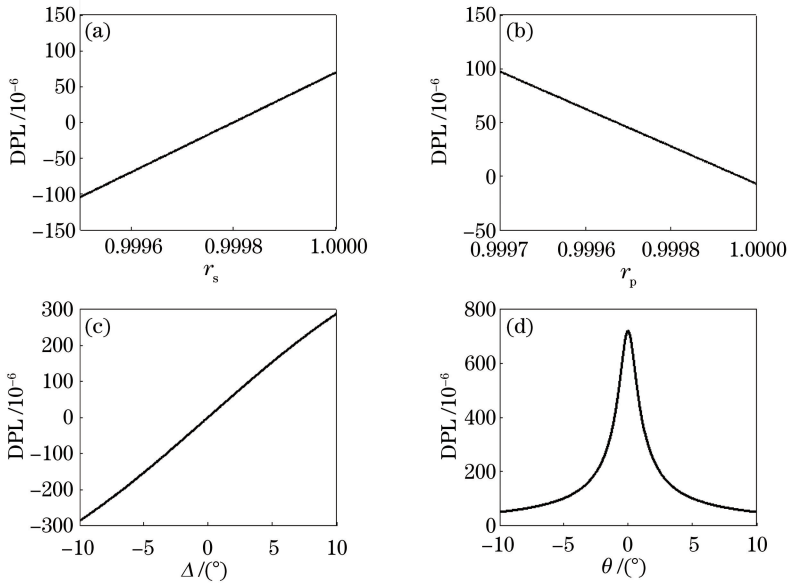


图2 差分偏振损耗随各参数的变化图。(a) s态反射率 r_s ; (b) p态反射率 r_p ; (c) s态、p态反射相移 Δ ; (d)非共面折叠角 θ

Fig. 2 Differential polarization loss versus parameters of resonator. (a) s-polarized reflectivity r_s ; (b) p-polarized reflectivity r_p ; (c) reflection-induced retardance Δ of s- and p-polarization; (d) non-coplanar folding angle θ

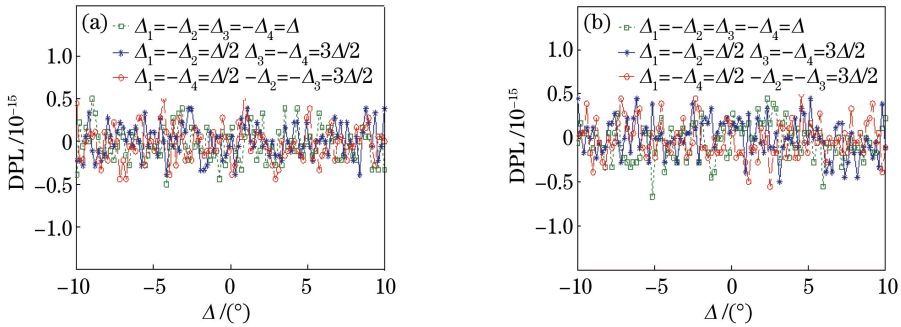


图3 4个反射镜反射相移和为0,且正负反射相移互相抵消时的差分偏振损耗变化图。(a) $+-+-$; (b) $++--$
 Fig. 3 Variation of differential polarization loss when sum of reflection-induced retardances of four mirrors is 0 and reflection-induced retardances of four mirrors, positive and negative, wipe one another out. (a) $+-+-$; (b) $++--$

即在 $\Delta_1 = \Delta_2 = -\Delta_3 = -\Delta_4 = \Delta$, $\Delta_1 = -\Delta_4 = n_1 \Delta$, $\Delta_2 = -\Delta_3 = n_2 \Delta$ ($n_1 \neq n_2$), 以及 $\Delta_1 = -\Delta_3 = n_1 \Delta$, $\Delta_2 = -\Delta_4 = n_2 \Delta$ ($n_1 \neq n_2$) 三种情况下, 差分偏振损耗也均为0, 结果如图3(b)所示, 其中假定 $n_1 = \frac{1}{2}$, $n_2 = \frac{3}{2}$ 。

上述两种反射镜配套参数降低了控制每个反射镜 s 态、p 态反射相移为 0 的镀膜要求。只要保证 4 个反射镜 s 态和 p 态反射相移和为 0, 且满足上述 6 种情况之一, 差分偏振损耗即为 0。

最后, 值得注意的是, 若反射镜配套参数仅满足 4 个反射镜 s 态、p 态的反射相移和为 0, 这时差分偏振损耗较小但不为 0, 结果如图 4 显示, 图 4 给出

了 $\Delta_1 = \frac{1}{2} \Delta$, $\Delta_3 = \frac{3}{2} \Delta$, $-\Delta_2 = -\Delta_4 = \Delta$ 和 $\Delta_1 = \Delta_2 = \Delta$, $-\Delta_3 = \frac{1}{2} \Delta$, $-\Delta_4 = \frac{3}{2} \Delta$ 两个实例。

4 结 论

采用琼斯矩阵自洽方法, 数值计算了四频差动激光陀螺非共面谐振腔各参数对差分偏振损耗的影响, 并基于工程实用性, 讨论确定了通过优化反射镜配套参数来减小差分偏振损耗的方法。计算结果表明: 差分偏振损耗随非共面折叠角的增大而增大; 反射镜 s 态、p 态反射率相等或反射相移为 0 时, 差分偏振损耗为 0, 其中反射镜 s 态、p 态反射相移对差分偏振损耗影响最为显著。在工程应用中, 为了使

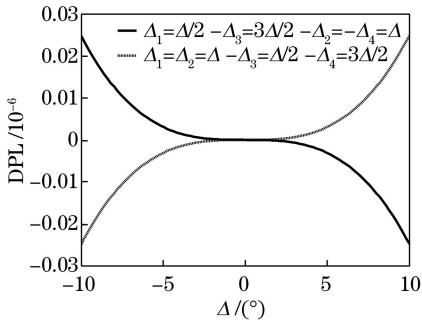


图4 仅4个反射镜反射相移和为0时的差分偏振损耗变化图

Fig. 4 Variation of differential polarization loss when only sum of reflection-induced retardances of four mirrors is 0

差分偏振损耗为0,在选配谐振腔反射镜时,反射镜配套参数须满足两个条件,一是4个反射镜s态、p态反射相移和为0,二是4个反射镜中任意两组反射镜的s态、p态反射相移正负相消。

参 考 文 献

- [1] Chow W W, Gea-Banacloche J, Pedrotti L M, et al. The ring laser gyro[J]. Reviews of Modern Physics, 1985, 57(1): 61-104.
- [2] Volk C H, Gillespie S C, Mark J G, et al. Multioscillator ring laser gyroscopes and their applications[J]. Optical Gyros and their Application. RTO AGARDograph, 1999, 339: 4.1-4.26.
- [3] Jiang Y N. Ring laser gyro[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1985: 1-5.
姜亚南. 环形激光陀螺[M]. 北京: 清华大学出版社, 1985: 1-5.

- [4] Gao B L, Li S T. Laser gyro [M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 1984: 1-7.
高伯龙, 李树棠. 激光陀螺[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1984: 1-7.
- [5] Yang Z F, Yuan X D, Zhang B, et al. The loss difference in differential laser gyros [J]. 1999, 26 (1): 39-42.
杨在富, 袁晓东, 张斌, 等. 四频差动激光陀螺中差分损耗的探讨[J]. 中国激光, 1999, 26(1): 39-42.
- [6] Yang Z F, Yuan X D, Zhang B, et al. The S-P anisotropy effects in differential laser gyros[J]. Acta Optica Sinica, 1998, 18(9): 1255-1260.
杨在富, 袁晓东, 张斌, 等. 四频差动激光陀螺中的S-P各向异性效应[J]. 光学学报, 1998, 18(9): 1255-1260.
- [7] Chow W, Hambenne J, Hutchings T, et al. Multioscillator laser gyro [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1980, 16(9): 918-936.
- [8] Gao B L. The locking phenomenon of second kind in differential laser gyro[J]. Journal of National University of Defense Technology, 1982, 4(1): 37-57.
高伯龙. 四频差动陀螺的第二类闭锁效应[J]. 国防科技大学学报, 1982, 4(1): 37-57.
- [9] Yan J X, Wei G H, Ha L Z, et al. Matrix optics [M]. Beijing: Ordnance Industry Press, 1995: 144-177.
阎吉祥, 魏光辉, 哈流柱, 等. 矩阵光学[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1995: 144-177.
- [10] Dorschner T A. Nonplanar rings for laser gyroscopes [J]. Proceedings of SPIE, 1983, 412: 192-202.