

“猫眼”逆反射器的偏振特性分析

李亚红,付跃刚,贺文俊,刘智颖,赵宇

(长春理工大学 光电工程学院,吉林 长春 130022)

摘要: 根据矢量场的光线追迹方法和光路的几何关系,推导得出入射高度(归一化)、折射率和逆反发散角之间的变化关系,以逆反发散角最小为目的,得出“猫眼”逆反射器的最佳设计参数,并利用 ZEMAX 进行光学设计。基于三维琼斯矩阵法对所设计的“猫眼”逆反射器进行了偏振光线追迹和偏振特性研究,重点分析了“猫眼”逆反射器的位相延迟和二向衰减特性及其对光束偏振态的影响,理论计算表明:“猫眼”逆反射器在出瞳面上的位相延迟最大不超过 0.3° ,二向衰减均低于 0.027,且线偏振态入射“猫眼”逆反射器,出射仍为线偏振态,即偏振方向保持不变。对此,利用 FRED 对所设计的“猫眼”逆反射器进行了以水平、 45° 、圆、椭圆偏振态入射的仿真模拟,验证其理论分析的正确性。结果表明:经“猫眼”逆反射器逆反后的偏振态仍与入射偏振态相同,偏振方向不发生改变,这与理论计算结果相一致,即“猫眼”逆反射器具有保偏振态不变的效应,这对“猫眼”逆反射器的推广应用具有重要意义。

关键词: “猫眼”逆反射器; 三维琼斯矩阵法; 位相延迟; 二向衰减; 偏振态

中图分类号: O436.3 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0620001

Polarization characteristics analysis of cat's eye retroreflector

Li Yahong, Fu Yuegang, He Wenjun, Liu Zhiying, Zhao Yu

(Institute of Opto-electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: According to the ray tracing method of the vector field and the geometrical relation of the optical path, the relations between normalized incident height, refractive index and divergence angle have been deduced. With the aim of minimizing the divergence angle, the optimum design parameters of cat's eye retroreflector have been obtained, and optical design of cat's eye retroreflector have been performed by ZEMAX. The polarization ray tracing and polarization properties analysis of cat's eye retroreflector were carried out based on the three-dimensional Jones matrix method, and the retardance and diattenuation of cat's eye retroreflector in the exit pupil of cat's eye retroreflector and the influences on the output polarization state were analyzed. The calculation results had shown that the maximum values of retardance and diattenuation were 0.3° and 0.027, which have no effect on the output polarization state. The FRED software was used to simulate the situation of cat's eye retroreflector with input horizontal, 45° linear and circular, elliptical polarization states, to verify the correctness of previous

收稿日期:2016-10-05; 修订日期:2016-11-03

基金项目:国家自然科学基金(11474037)

作者简介:李亚红(1990-),女,博士生,主要从事光学设计、偏振光理论与应用等方面的研究。Email:irene1129@163.com

通讯作者:刘智颖(1981-),女,教授,博士生导师,主要从事光谱偏振成像技术和仿生光学等方面的研究。Email:lzy@cust.edu.cn

theoretical analysis. The simulation results have indicated that the output polarization state is the same as that of the input polarization state through cat's eye retroreflector, that is to say, cat's eye retroreflector has the polarization state-preserving effect, which is significant for the expand application for cat's eye retroreflector.

Key words: cat's eye retroreflector; three-dimensional Jones matrix method; retardance; diattenuation; polarization state

0 引言

逆反射器是较为常用的光学器件之一,可以对光的传播方向实现 180° 逆转,因此被广泛应用于激光谐振腔、偏振干涉、大气和水体吸收测量等领域。在激光谐振腔内,工作物质受激发射出的光波在来回反射放大过程中,逆反射器的偏振特性直接影响光波的偏振性,严重时会使激光光束产生消偏现象,导致激光器无法正常工作^[1]。在偏振干涉系统中,逆反射器的偏振特性也将直接影响到测量信号,从而导致测量精度的降低^[2-4]。在大气和水体吸收测量中,逆反射器的偏振特性会改变测量光束的偏振态,而大气和水体对不同偏振态具有不同的吸收,因此,测量结果的准确性也会受到影响^[5-6]。

目前,被广泛应用的光学逆反射器主要有角锥棱镜和“猫眼”逆反射器,“猫眼”逆反射器是国内近些年来新兴的一种逆反射器,商业上已广泛应用,如索佳无协助目标电子全站仪 SET2230RM 应用直径为 8 mm 的“猫眼”逆反射器,可实现 200 m 范围内的准确测量。由于“猫眼”逆反射器相比于角锥棱镜具有接收角大、测量中心稳等特点,在工程上正在逐渐代替角锥棱镜。日本国家计量院采用高折射率为 1.999 81 的光学玻璃 TAFD44 制作了直径为 50 mm 的“猫眼”逆反射器作为激光跟踪目标镜^[2];国内林永兵等人对“猫眼”逆反射器对激光跟踪测量光路的影响做了详细分析^[7],并对“猫眼”逆反射器进行了优化设计。

文中结合“猫眼”逆反射器在干涉测量中的应用,以逆反发散角最小为优化目的,分析得出“猫眼”逆反射器的最佳设计参数,基于矢量光线追迹理论和三维琼斯矩阵法,对“猫眼”逆反射器进行了偏振光线追迹;并分析了“猫眼”逆反射器在出瞳处的位相延迟和二向衰减分布以及“猫眼”逆反射器自身的

偏振特性对出射偏振态的影响;通过光学仿真软件 FRED 对上述“猫眼”逆反射器进行建模并仿真模拟,验证了理论分析的正确性。

1 “猫眼”逆反射器的参数分析

“猫眼”逆反射器的结构形式多种多样,如双半球型“猫眼”逆反射器^[7]、球形“猫眼”逆反射器^[2-3]和双层球形“猫眼”逆反射器^[8]等。传统的“猫眼”逆反射器是由前后两半球胶合组成,典型代表为 Leica 公司生产的 CER75。这种“猫眼”逆反射器的前后半球半径大小与折射率有关,当折射率等于 2.000 时,可以制作为球形,如图 1 示。由于这种“猫眼”逆反射器自身具有严格的 180° 旋转对称性,可实现 ±90° 全视角入射。以任意方位入射到“猫眼”逆反射器时,如图 1(a)所示,均可等效如图 1(b)所示的入射情况。

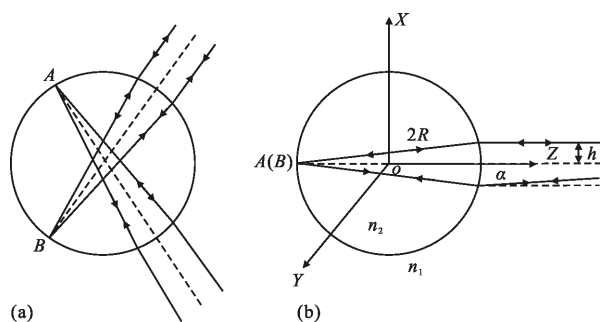


图 1 “猫眼”逆反射器的示意图

Fig.1 Diagram of cat's eye retroreflector

逆反发散角是衡量“猫眼”逆反射器工作性能的重要指标。从图 1 中显而易见:任意一近轴入射光,只有当经过球形“猫眼”逆反射器前半球面后聚焦于后半球面 B 点处时,逆反光束才能准直出射。根据折/反射定律和光线在“猫眼”逆反射器内经过的光路的几何关系,可得:

$$n = \sqrt{2 \left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{h}{R} \right)^2} \right)} \quad (1)$$

$$\alpha = 4\arcsin\left(\frac{h}{nR}\right) - 2\arcsin\left(\frac{h}{R}\right) \quad (2)$$

为了简化变量，对入射高度做归一化处理，可得：折射率 n 与入射高度 h/R 和逆反发散角 α 的变化关系曲线分别如图 2(a)和(b)所示。

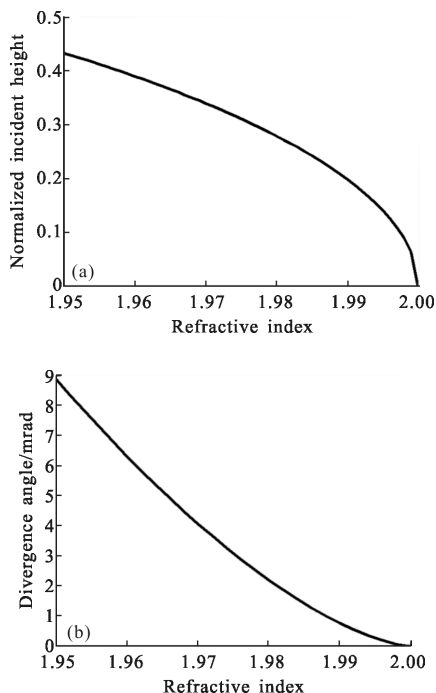


图 2 折射率 n 与入射高度 h/R 、逆反发散角 α 的关系曲线
Fig.2 Relation between refractive index n and incident height h/R , divergence angle α

一般地，当逆反发散角大于 9 mrad 时，“猫眼”逆反射器将失去应用价值^[7]。由图 2(b)可得：折射率不得小于 1.95。结合成都光明玻璃库，选取出符合要求的光学玻璃 H-ZLAH89L 和 LAH79，折射率 n 分别为 1.953 75 和 1.996 13。两种光学玻璃所对应的入射高度 h/R 与逆反发散角 α 的变化关系分别如图 3 (a)和(b)所示。

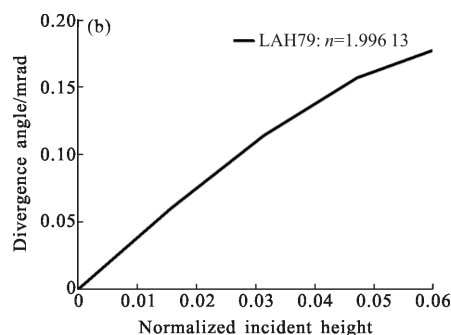
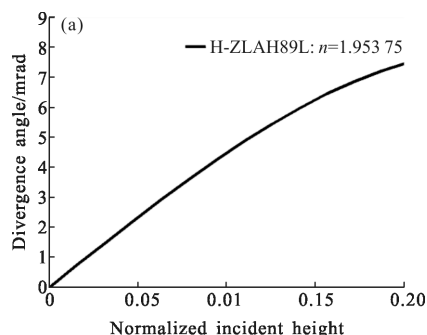


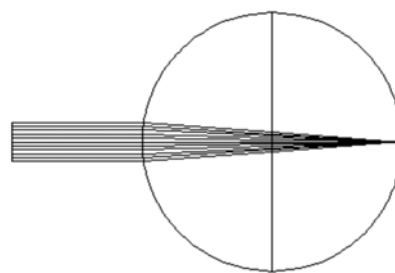
图 3 归一化入射高度 h/R 与逆反发散角 α 的关系曲线
Fig.3 Relation between normalized incident height h/R and divergence angle α

对比图 3(a)和图(b)，发现发散角 α 与入射高度 h/R 之间存在着正比例关系，而由图 2(b)可知，折射率 n 与逆反发散角 α 是反比例关系。

综上所述，得出“猫眼”逆反射器的最佳设计参数为：H-ZLAH89L ($n=1.953\ 75$) 和 $h/R < 0.2$ 。利用 ZEMAX 进行光学设计，设计参数和结果分别如图 4(a)、(b)所示。

Surf: type	Radius	Thickness	Glass	Semi-diameter
OBJ	Standard	Infinity	Infinity	0.000 000
1	Standard	Infinity	30.000 000	4.500 000
2*	Standard	29.912 269	V 29.942 777	H-ZLAH89L S 29.955 613
STO*	Standard	Infinity	P 29.942 777	H-ZLAH89L P 29.955 613
4*	Standard	-29.912 269	P 0.000 000	H-ZLAH89L P 29.955 613
IMA*	Standard	-29.912 269	P -	29.955 613

(a)



(b)

图 4 “猫眼”逆反射器的 ZEMAX 光学设计
Fig.4 Optical design of cat's eye retroreflector by ZEMAX

2 “猫眼”逆反射器的偏振光线追迹

首先，根据矢量场的光线追迹方法，对“猫眼”逆反射器进行几何光线追迹，确定光线到达各个介质分界面上的传播矢量 \vec{K} ，进而求得 s 波矢量 \vec{S} 和 p 波矢量 \vec{P} ；其次，在 \vec{S} 、 \vec{P} 和 \vec{K} 构成的局部坐标系下，

根据菲涅尔公式,求得各个介质分界面对光线作用的琼斯矩阵;最后,基于坐标变换的矩阵论相关理论,在全局坐标系 XYZ 下,推导得出各个介质分界面对光线的累积作用所对应的总的琼斯矩阵,即“猫眼”逆反射器的琼斯矩阵。

在如图 2 所示的全局坐标系 XYZ 下,光线沿着 Z 轴方向平行入射到“猫眼”逆反射器,即入射光矢量 $\vec{I}=(0,0,-1)^T$ 。在“猫眼”逆反射器内发生折射、反射和折射,实现光线逆反出射。根据矢量光线追迹理论,对“猫眼”逆反射器进行几何光线追迹^[9],即

$$\begin{aligned} \vec{R} &= \vec{I} - 2(\vec{I} \cdot \vec{N})\vec{N} \\ \vec{T} &= \frac{n_1}{n_2} \vec{I} + \left(\frac{n_1}{n_2} \cos\theta_i - \sqrt{1 - \frac{n_1^2}{n_2^2}(1 - \cos^2\theta_i)} \right) \vec{N} \\ \cos\theta_i &= -\vec{I} \cdot \vec{N} \end{aligned} \quad (3)$$

式中: \vec{I} 、 \vec{R} 、 \vec{N} 和 \vec{T} 分别为归一化后的入射光矢量、反射光矢量、法向矢量和透射光矢量; θ_i 为入射角; n_1 为介质折射率; n_2 为“猫眼”逆反射器的折射率。

由上述公式(3)可以确定光线到达各个介质分界面上的传播矢量 \vec{K} ,根据 s 波和 p 波的物理定义,由传播矢量 \vec{K} 可以求得 s 波矢量 \vec{S} 和 p 波矢量 \vec{P} ,即

$$\begin{aligned} \vec{S}_{in} &= \vec{K}_{in} \times \vec{K}_{out} / |\vec{K}_{in} \times \vec{K}_{out}| \\ \vec{P}_{in} &= \vec{K}_{in} \times \vec{S}_{in} \\ \vec{S}_{out} &= \vec{S}_{in} \\ \vec{P}_{out} &= \vec{K}_{out} \times \vec{S}_{out} \end{aligned} \quad (4)$$

当光线到达“猫眼”逆反射器的介质分界面上发生折射或反射时,介质分界面对光线作用可表达为:

$$\vec{E}_{out} = P_{rt} \cdot \vec{E}_{in} \quad (5)$$

式中: \vec{E}_{in} 和 \vec{E}_{out} 分别为入射偏振态和出射偏振态; P_{rt}

为介质分界面上发生折射或反射时对光线作用的琼斯矩阵。

由于不同偏振态入射到介质分界面发生折射或反射时,会产生不同的振幅透过率、振幅反射率或位相延迟,导致介质分界面对不同偏振态具有不同的偏振作用。任意光矢量均可分解为 s 波矢量 \vec{S} 和 p 波矢量 \vec{P} ,且都与传播矢量 \vec{K} 相互垂直,因此 \vec{S} 、 \vec{P} 和 \vec{K} 构成一个局部坐标系。在该坐标系下,根据菲涅尔公式,可以求得发生折射或反射的介质分界面对应的琼斯矩阵 J_{rt} ,可表达为:

$$J_r = \begin{pmatrix} r_s & 0 & 0 \\ 0 & r_p & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad J_t = \begin{pmatrix} t_s & 0 & 0 \\ 0 & t_p & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

式中: r_s 和 r_p 分别为 s 波和 p 波的振幅反射系数; t_s 和 t_p 分别 s 波和 p 波的振幅透射系数。

利用局部坐标系与全局坐标系之间的变换关系,将公式(6)转换为在全局坐标系 XYZ 下的琼斯矩阵 P_{rt} 。结合矩阵论相关知识,可得局部坐标系与全局坐标系之间的转换矩阵的表达式为:

$$O_{in} = \begin{pmatrix} S_{in,x} & P_{in,x} & K_{in,x} \\ S_{in,y} & P_{in,y} & K_{in,y} \\ S_{in,z} & P_{in,z} & K_{in,z} \end{pmatrix} \quad O_{out} = \begin{pmatrix} S_{out,x} & P_{out,x} & K_{out,x} \\ S_{out,y} & P_{out,y} & K_{out,y} \\ S_{out,z} & P_{out,z} & K_{out,z} \end{pmatrix} \quad (7)$$

由此可得,在全局坐标系下的琼斯矩阵 P_{rt} 的表达形式为:

$$P_{rt} = O_{out} \cdot J_{rt} \cdot O_{in}^{-1} \quad (8)$$

入射光线到达“猫眼”逆反射器,先后经过折射-反射-折射,各个介质分界面对光线的累积作用,即“猫眼”逆反射器所对应的总的琼斯矩阵 P_{Total} 为:

$$P_{Total} = P_{r1} \cdot P_r \cdot P_{r2} \quad (9)$$

利用 MATLAB 编程辅助计算,对“猫眼”逆反射器进行偏振光线追迹,结果如表 1 所示。

表 1 “猫眼”逆反射器的光线追迹结果

Tab.1 Ray tracing results of spherical cat's eye retroreflector

q	\vec{K}_q	\vec{N}_q	\vec{s}_q	\vec{p}_q	\vec{p}'_q	J_q	P_q
1	$\begin{pmatrix} -0.0167 \\ -0.0167 \\ -0.9997 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.0333 \\ 0.0167 \\ 0.9997 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -0.7071 \\ 0.7071 \\ 0.0000 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.7071 \\ 0.7071 \\ 0.0000 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.7069 \\ 0.7069 \\ -0.0236 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.6663 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.6665 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 1.0000 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.6663 & 0.0000 & 0.0167 \\ 0.0000 & 0.6663 & 0.0167 \\ -0.0111 & -0.0111 & 0.9997 \end{pmatrix}$
2	$\begin{pmatrix} -0.0167 \\ -0.0167 \\ -0.9997 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.0000 \\ 0.0000 \\ 1.0000 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -0.8944 \\ 0.4472 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.4469 \\ 0.8938 \\ -0.0373 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -0.4469 \\ -0.8938 \\ -0.0372 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.3333 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & -0.3333 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 1.0000 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.3335 & 0.0002 & 0.0111 \\ 0.0002 & 0.3335 & 0.0111 \\ -0.0111 & -0.0111 & -0.9996 \end{pmatrix}$
3	$\begin{pmatrix} -0.0000 \\ -0.0000 \\ 1.0000 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.0000 \\ 0.0000 \\ 1.0000 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -0.7071 \\ 0.7071 \\ 0.0000 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -0.7069 \\ -0.7069 \\ -0.0236 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -0.7071 \\ -0.7071 \\ 0.0000 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1.3337 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & 1.3341 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 1.0000 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -0.0002 & 1.3335 & 0.0314 \\ -1.3339 & 0.0002 & 0.0000 \\ 0.0000 & -0.0236 & 0.9997 \end{pmatrix}$

由上述追迹结果,根据公式(9)可求得“猫眼”逆反射器对应的总的琼斯矩阵 P_{Total} ,如公式(10)所示:

$$P_{Total}=P_3 \cdot P_2 \cdot P_1 = \begin{pmatrix} 0.0001 & 0.0001 & -0.0092 \\ -0.2963 & 0.0000 & -0.0222 \\ 0.0037 & -0.0015 & -0.9998 \end{pmatrix} \quad (10)$$

假设入射光源为 He-Ne 激光,偏振方向沿着 Y 方向,即偏振态为 $\vec{E}_{in}=(0,1,0)^T$,结合公式(5)和(10),可求得 He-Ne 激光经“猫眼”逆反射器逆反后,出射的偏振态仍为 Y 方向线偏振态,即 $\vec{E}_{out}=(0,-0.2963,0)^T$ 。

3 “猫眼”逆反射器的偏振特性分析

对“猫眼”逆反射器的偏振特性分析,其本质是基于“猫眼”逆反射器的琼斯矩阵,从中解析出表征其偏振特性的物理量,常见的如位相延迟、二向衰减和退偏效应等^[10-11]。

基于三维琼斯矩阵法研究“猫眼”逆反射器的偏振特性,由于算法自身的局限性,文中只研究“猫眼”逆反射器的位相延迟和二向衰减的特性及其对入射光束偏振态的影响。

3.1 位相延迟算法

位相延迟一般包括两种:一种是由于光学系统中玻璃折射率的不均匀性、面形误差等导致的光程不同而引起的位相延迟;另一种则是由于光学系统自身的特性对不同的入射偏振态会产生不同的位相延迟。文中所要研究的位相延迟正是第二种。

上述第 2 节中,基于三维琼斯矩阵法求得的“猫眼”逆反射器的琼斯矩阵 P_{Total} 中,不仅包含各个介质分界面对光束的偏振作用,也包含坐标系之间的几何变换作用。

文中所要研究分析的是“猫眼”逆反射器自身的偏振特性,因此,需要寻找一种方法将琼斯矩阵 P_{Total} 包含的几何变换作用从中剔除^[12],获得只包含偏振作用的琼斯矩阵 P 。对琼斯矩阵 P 进行极分解,分别得到位相延迟矩阵和二向衰减矩阵。对位相延迟矩阵进行特征值和特征向量的求解,其中必有一个特征值为 1,其他两个特征值的特征向量对应出射光波的两个本征态,二者之间的位相差,即为“猫眼”逆反射器的位相延迟。

3.2 二向衰减算法

光学系统的透过光强对入射偏振态具有选择性,即以某一偏振态入射时,透过光强最大值,而以

另一种偏振态入射时,透过光强值最小值,因此,有了二向衰减的定义,即

$$D = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \quad (0 \leq D \leq 1) \quad (11)$$

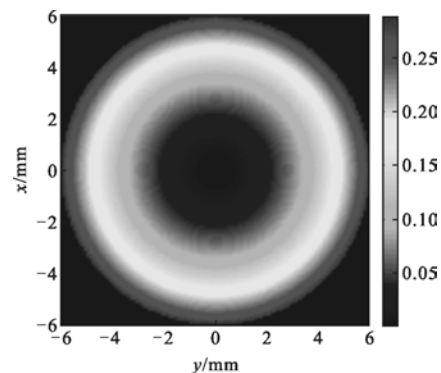
“猫眼”逆反射器的最大透过光强和最小透过光强没法直接获得,因此,同理,需借助于第 2 节求得的“猫眼”逆反射器的琼斯矩阵 P_{Total} ,对其进行解析获得“猫眼”逆反射器的二向衰减特性。

文中采用 Chipman 教授所提出的分析方法^[12],即对琼斯矩阵 P_{Total} 进行奇异值分解的方法,求得最大光强和最小光强所对应的奇异值,通过化简,可将公式(11)等效表达为:

$$D = \frac{\sigma_1^2 - \sigma_2^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \quad (0 < \sigma_1 < \sigma_2 < 1) \quad (12)$$

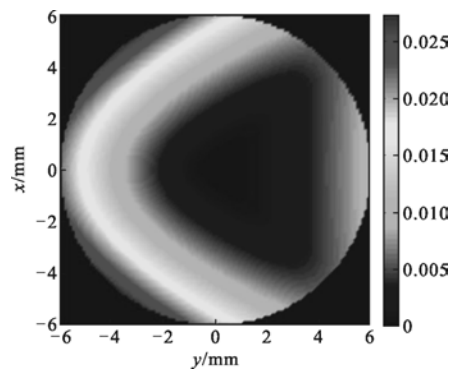
3.3 “猫眼”逆反射器的偏振特性

综上基于三维琼斯矩阵的位相延迟算法和二向衰减算法,利用 MATLAB 编程辅助计算,可得“猫眼”逆反射器的位相延迟和二向衰减在出瞳面上的平面分布,分别如图 5(a)和(b)所示。



(a) 出瞳面上的位相延迟分布

(a) Layout of retardance in the exit pupil



(b) 出瞳面上的二向衰减分布

(b) Layout of diattenuation in the exit pupil

图 5 “猫眼”逆反射器的偏振特性

Fig.5 Polarization characteristics of cat's eye retroreflector

由图 5(a)可知,“猫眼”逆反射器的位相延迟大小随着入射高度(归一化)的增大而增大,最大位相延迟不超过 0.3° ;由图 4(b)可看出,二向衰减分布关于 X 轴对称,且最大二向衰减为 0.027。由此可知,“猫眼”逆反射器对入射光的偏振作用非常小,结合第 2 节理论分析结果,线偏振光入射“猫眼”逆反射器时,出射光仍为线偏振光,且偏振方向一致,由此可得:“猫眼”逆反射器具有保偏振态不变的效应。

4 FRED 仿真模拟与验证

利用光学工程仿真软件 FRED 对所设计的“猫眼”逆反射器进行建模与仿真模拟,分别以水平、 45° 、圆和椭圆偏振态入射,经“猫眼”逆反射器逆反后,出射光束在出瞳面上的偏振态分布分别如图 6(a)~(d)所示。

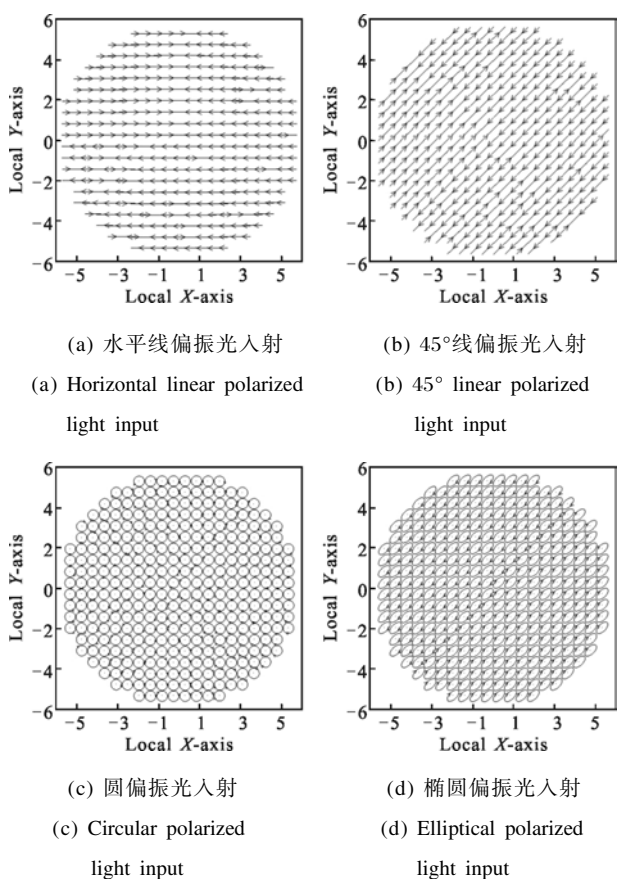


图 6 逆反光束的偏振态分布

Fig.6 Polarization states layout of retroreflected light

由图 6 中的仿真结果可以看出,以水平线偏振光入射时,逆反光束在出瞳面上的偏振态分布仍为水平线偏振光,以 45° 线偏振光入射时,逆反光束偏

振态在出瞳处的分布仍为 45° 线偏振光,以圆偏振光或椭圆偏振光入射时,同理,逆反光束的偏振态与入射偏振态保持一致。由此可知,“猫眼”逆反射器具有保偏振态的效应,同时,也验证了第 2 节理论分析的正确性。

5 结论

文中结合“猫眼”逆反射器在工程中的使用要求,以逆反发散角最小为目的,根据矢量场的光线追迹方法和光路的几何关系,推导得出了“猫眼”逆反射器的折射率、入射高度和逆反发散角之间的变化关系,并分析得出“猫眼”逆反射器的最佳设计参数: H-ZLAH89L($n=1.95375$)和 $h/R < 0.2$ 。基于三维琼斯矩阵法对“猫眼”逆反射器进行了详细的偏振光追迹,并重点分析了“猫眼”逆反射器出瞳处的位相延迟和二向衰减特性,最大位相延迟为 0.3° ,最大二向衰减为 0.027,二者对入射光束偏振态的影响非常小,甚至可以忽略不计。最后利用 FRED 对“猫眼”逆反射器进行了仿真模拟,分别以水平、 45° 、圆和椭圆偏振光入射,结果表明:出射光束的偏振态与入射偏振态保持一致,偏振方向不发生改变,与前面理论分析结果相一致。由此可知,“猫眼”逆反射器具有保持偏振态不发生改变的特性,这对“猫眼”逆反射器的推广应用具有重要意义。

参考文献:

- [1] Ou Jiaming, Li Yan, Zhang Shulian, et al. He-Ne laser with a CER cavity [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2000 (7): 27-30. (in Chinese)
欧家鸣, 李岩, 张书练, 等. CER 腔 He-Ne 激光器 [J]. 激光与光电子学进展, 2000(7): 27-30.
- [2] Takatsuji T, Goto M, Osawa S, et al. Whole-viewing-angle cat's-eye retroreflector as a target of laser trackers [J]. *Measurement Science and Technology*, 1999, 10(7): N87.
- [3] Nakamura O, Goto M, Toyoda K, et al. A laser tracking robot performance calibration system using ball-seated bearing mechanisms and a spherically shaped cat's-eye retroreflector [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1994, 65 (4): 1006-1011.
- [4] Yang B, Friedsam H. Ray-tracing studies for a whole-viewing-angle retroreflector [R]. Office of Scientific & Technical Information Technical Reports, 2000, 38: 1-14.

- [5] He Junjun. Experimental analysis of zenith region skylight polarization pattern [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2012. (in Chinese)
何均均. 天顶区域大气偏振特性的实验分析研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2012.
- [6] Liu Jia, Huang Haiqing, Bai Yan, et al. Influences of liner polarization light on the measurement of water absorption coefficient[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(6): 10–19. (in Chinese)
刘佳, 黄海清, 白雁, 等. 不同线偏振光对水体吸收系数测量的影响[J]. 光学学报, 2014, 34(6): 10–19.
- [7] L Yongbing, Z Guoxiong, L Zhen. An improved cat' s-eye retroreflector used in a laser tracking interferometer system[J]. *Measurement Science & Technology*, 2003, 14(6): N36–40.
- [8] Li Yahong, Fu Yuegang, He Wenjun, et al. Optical design of wide-viewing-angle spherical retroreflector [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(11): 149–153. (in Chinese)
李亚红, 付跃刚, 贺文俊, 等. 大视场球形逆反射器的光学设计[J]. 光子学报, 2015, 44(11): 149–153.
- [9] He W, Fu Y, Zheng Y, et al. Polarization properties of a corner-cube retroreflector with three-dimensional polarization ray-tracing calculus[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(19): 4527–4535.
- [10] Gil J J. Polarimetric characterization of light and media[J]. *The European Physical Journal Applied Physics*, 2007, 40(1): 1–47.
- [11] Waluschka E. Polarization ray tracing [J]. *Optical Engineering*, 1988, 28(21): 86–89.
- [12] Chipman R A. Polarization ray tracing [J]. *Polarization Considerations for Optical Systems*, 1988, 28(2):104–111.