

偏振态对角锥棱镜远场衍射分布的影响

周 辉,¹李 松¹,石 岩¹,翁兴涛¹,王嘉平²

(1. 武汉大学 电子信息学院,湖北 武汉 430079;
2. 苏州第一光学仪器厂,江苏 苏州 215006)

摘 要:分析了线偏振光垂直入射到角锥棱镜经三个直角面依次反射后出射光线偏振态的变化。利用衍射理论,计算了出射光两正交偏振分量各自的远场衍射分布,模拟出了相应的光场衍射分布图,并将计算结果与不考虑偏振态情况下的远场衍射图进行了比较分析,证明两者间存在明显差别。所得结果为不同使用要求下角锥棱镜的理论设计提供了依据。

关键词:角锥棱镜; 位相突变; 偏振效应; 远场衍射

中图分类号:TN21;O436 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-2276(2004)04-0418-05

Effect of polarization on the far-field diffraction of ideal cube corner retroreflector

ZHOU Hui¹, LI Song¹, SHI Yan¹, WENG Xing-tao¹, WANG Jia-ping²

(1. The Institute of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430079, China;
2. Suzhou First Optical Instrument Factory, Suzhou 215006, China)

Abstract: The polarization variation of a reflector light after a bundle of linear polarization light is incident on the ideal cube corner retroreflector is analyzed. Diffraction distribution about the orthogonal polarization quantities of a reflector light is calculated with Fresnel diffraction theory and the correlative diffraction diagram is drawn. Meanwhile, the comparison with the diffraction diagram without considering the polarization effect proves that they are different obviously. At the same time, the result provides the grounds for the theoretical design of cube corner reflector with different usage requirement.

Key words: Cube corner retroreflector; Phase revulsion; Polarization effect; Far-field diffraction

0 引 言

角锥棱镜是一种常见的光学元件,广泛应用于激光测距、激光通信等领域。在上述应用中,接收系统探测的是激光光束经角锥棱镜反射后的远场衍射。因

此从纯粹的几何光学理论出发进行角锥棱镜的设计往往会给棱镜的有效使用带来一系列的问题。此外,由于在多数应用中,角锥棱镜的反射面上并不镀金属反射膜,因此入射光束在各反射面上发生全反射时面临着位相突变和出射光束偏振态改变的问题。目前国内对角锥棱镜的偏振特性^[1,2]、远场衍射特性都进

收稿日期:2003-08-10; 修订日期:2003-10-12

作者简介:周辉(1979-),男,江西临川人,硕士生,主要从事激光卫星通讯方面的研究。

行了一定的探讨^[3],但从衍射理论出发推导角锥棱镜偏振特性对远场分布的影响却还未见报道;但工程应用中却大量使用了不镀反射膜的角锥棱镜,因此研究角锥棱镜偏振特性对远场分布的影响对设计角锥棱镜有一定的指导意义。为此本文计算了线偏振光经过未镀膜的实心角锥棱镜直角面全反射(TIR)后偏振态的变化,同时,利用衍射理论,推导了出射光两正交偏振分量的衍射场分布,用计算机模拟出其相关的衍射图样,在不考虑偏振态变化和考虑偏振态变化这两种不同情况下,经角锥棱镜反射后的远场衍射光场分布有明显差异,证明角锥棱镜的偏振效应是正确接收远场衍射光场必须考虑的问题。

1 角锥棱镜偏振特性的描述

不考虑角锥棱镜的加工误差,当一束在一定角度内分布的平行光进入角锥棱镜,经过三个直角面的反射后,根据反射次序不同分成六束光线,这六束出射光均与原入射光严格平行且反向。入射、出射光束的关系及不同区域光束反射顺序如图 1、图 2 所示。

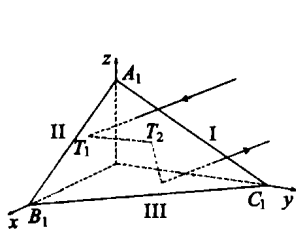


图 1 角锥棱镜的结构原理图

Fig. 1 Structure principle of cube corner retroreflector

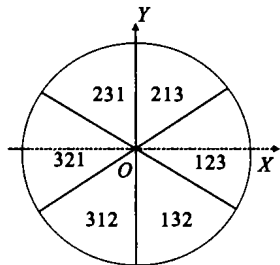


图 2 棱镜底面区域简图

Fig. 2 Schematic of the base plane partition

光束在棱镜内部要依次经过三个直角反射面的全内反射。在某一反射面发生全内反射时,相对于入射平面平行和垂直的两个振动分量要发生位相突变。若用 δ 和 δ_{\perp} 分别表示经某一反射面反射后平行和垂直的两个振动分量的相位突变,则 δ 和 δ_{\perp} 为^[1]:

$$\begin{aligned} \delta &= -2\arctg\left(\frac{\sqrt{\sin^2\theta_1 - n^2}}{n^2 \cos\theta_1}\right) \\ \delta_{\perp} &= -2\arctg\left(\frac{\sqrt{\sin^2\theta_1 - n^2}}{\cos\theta_1}\right) \end{aligned} \quad (1)$$

式中 $n = n_2/n_1$ (n 是光疏媒质对光密媒质的相对折

射率); θ_1 是光线的入射角。

光束在角锥棱镜中经历三次全内反射,由于三次全内反射入射面的方位都不同,故不能通过对每次位相的简单迭加来求总的 δ 和 δ_{\perp} 。利用参考文献[5]中的方法,计算出了一振幅为 1 的线偏振光经过六种不同反射次序后出射光两正交偏振分量的大小:

(1) 经过 I → II → III 反射次序

$$\begin{aligned} B_1 &= \frac{1}{8}\cos^2\alpha[3e^{i(2\delta_{\perp} + \delta)} - 6e^{i(2\delta + \delta_{\perp})} - e^{i3\delta}] + \\ &\quad \frac{1}{8}\sin^2\alpha[6e^{i(2\delta + \delta_{\perp})} - 3e^{i(2\delta_{\perp} + \delta)} + e^{i3\delta_{\perp}}] - \frac{\sqrt{3}}{8}\sin\alpha \times \\ &\quad \cos\alpha[3e^{i(2\delta + \delta)} + 3e^{i(2\delta_{\perp} + \delta_{\perp})} + e^{i3\delta_{\perp}} + e^{i3\delta}] \\ C_1 &= \frac{\sqrt{3}}{8}\cos^2\alpha[2e^{i(2\delta_{\perp} + \delta)} + e^{i(2\delta + \delta_{\perp})} + e^{i3\delta}] - \\ &\quad \frac{\sqrt{3}}{8}\sin^2\alpha[2e^{i(2\delta + \delta_{\perp})} + e^{i(2\delta_{\perp} + \delta)} + e^{i3\delta}] - \\ &\quad \frac{1}{8}\sin\alpha\cos\alpha[3e^{i(2\delta_{\perp} + \delta)} + 3e^{i(2\delta + \delta_{\perp})} + e^{i3\delta_{\perp}} + e^{i3\delta}] \end{aligned} \quad (2)$$

(2) 经过 I → III → II 反射次序

$$\begin{aligned} B_2 &= \frac{1}{4}\cos^2\alpha[e^{i3\delta} + 3e^{i(2\delta_{\perp} + \delta)}] - \\ &\quad \frac{1}{4}\sin^2\alpha[e^{i3\delta_{\perp}} + 3e^{i(2\delta + \delta_{\perp})}] + \\ &\quad \frac{1}{16}[3e^{i(2\delta_{\perp} + \delta)} - e^{i3\delta_{\perp}} + e^{i3\delta} - 3e^{i(2\delta + \delta_{\perp})}] \\ C_2 &= \frac{\sqrt{3}}{16}[e^{i(2\delta + \delta_{\perp})} - e^{i(2\delta_{\perp} + \delta)} + e^{i3\delta} - e^{i3\delta_{\perp}}] + \\ &\quad \frac{1}{4}\sin\alpha\cos\alpha[e^{i3\delta_{\perp}} + 3e^{i(2\delta_{\perp} + \delta)} + e^{i3\delta} + 3e^{i(2\delta + \delta_{\perp})}] \end{aligned} \quad (3)$$

(3) 经过 II → I → III 反射次序

$$\begin{aligned} B_3 &= \frac{1}{8}\cos^2\alpha[3e^{i(2\delta_{\perp} + \delta)} - 6e^{i(2\delta + \delta_{\perp})} - e^{i3\delta}] + \\ &\quad \frac{1}{8}\sin^2\alpha[6e^{i(2\delta + \delta_{\perp})} - 3e^{i(2\delta_{\perp} + \delta)} + e^{i3\delta_{\perp}}] + \\ &\quad \frac{\sqrt{3}}{8}\sin\alpha\cos\alpha[3e^{i(2\delta_{\perp} + \delta)} + 3e^{i(2\delta + \delta_{\perp})} + e^{i3\delta_{\perp}} + e^{i3\delta}] \\ C_3 &= -\frac{\sqrt{3}}{8}\cos^2\alpha[2e^{i(2\delta_{\perp} + \delta)} + e^{i(2\delta + \delta_{\perp})} + e^{i3\delta_{\perp}}] + \\ &\quad \frac{\sqrt{3}}{8}\sin^2\alpha[2e^{i(2\delta + \delta_{\perp})} + e^{i(2\delta_{\perp} + \delta)} + e^{i3\delta}] - \\ &\quad \frac{1}{8}\sin\alpha\cos\alpha[3e^{i(2\delta_{\perp} + \delta)} + 3e^{i(2\delta + \delta_{\perp})} + e^{i3\delta_{\perp}} + e^{i3\delta}] \end{aligned} \quad (4)$$

(4) 经过 II → III → I 反射次序

$$B_4 = B_2$$

$$C_4 = \frac{\sqrt{3}}{16} [e^{i(2\delta_+ + \delta_-)} - e^{i(2\delta_- + \delta_+)} + e^{i3\delta_-} - e^{i3\delta_+}] + \frac{1}{4} \sin\alpha \cos\alpha [e^{i3\delta_-} + 3e^{i(2\delta_- + \delta_+)} + e^{i3\delta_+} + 3e^{i(2\delta_+ + \delta_-)}]$$

(5)

(5) 经过 III → I → II 反射次序

$$B_5 = B_3$$

$$C_5 = -\frac{\sqrt{3}}{8} \cos^2\alpha [e^{i(2\delta_- + \delta_+)} + 2e^{i(2\delta_+ + \delta_-)} + e^{i3\delta_+}] + \frac{\sqrt{3}}{8} \sin^2\alpha [e^{i(2\delta_+ + \delta_-)} + 2e^{i(2\delta_- + \delta_+)} + e^{i3\delta_-}] - \frac{1}{8} \sin\alpha \cos\alpha [3e^{i(2\delta_- + \delta_+)} + 3e^{i(2\delta_+ + \delta_-)} + e^{i3\delta_-} + e^{i3\delta_+}]$$

(6)

(6) 经过 III → II → I 反射次序

$$B_6 = B_1$$

$$C_6 = \frac{\sqrt{3}}{8} \cos^2\alpha [e^{i(2\delta_- + \delta_+)} + 2e^{i(2\delta_+ + \delta_-)} + e^{i3\delta_+}] - \frac{\sqrt{3}}{8} \sin^2\alpha [e^{i(2\delta_+ + \delta_-)} + 2e^{i(2\delta_- + \delta_+)} + e^{i3\delta_-}] - \frac{1}{8} \sin\alpha \cos\alpha [3e^{i(2\delta_- + \delta_+)} + 3e^{i(2\delta_+ + \delta_-)} + e^{i3\delta_-} + e^{i3\delta_+}]$$

(7)

式中 B 分量为沿原线偏振光振动方向的偏振分量； C 分量为沿垂直于原线偏振光方向的出射光偏振分量； α 为入射线偏振光的初始偏振方位角^[5]。

从公式(2)~公式(7)可以看出， B 、 C 两分量均为一复数，因而可以写为：

$$B_n = |B_n| \exp(i\phi_{B_n})$$

$$C_n = |C_n| \exp(i\phi_{C_n})$$

(8)

式中 $|B_n|$ 和 $|C_n|$ 分别表示两偏振分量的振幅； ϕ_{B_n} 和 ϕ_{C_n} 分别表示两偏振分量的位相值。

很明显，对于某一反射次序的出射光，当 $\phi_{B_n} \neq \phi_{C_n}$ 时，出射光为椭圆偏振光。只有当 $\phi_{B_n} - \phi_{C_n} = m\pi$ ($m=0, \pm 1 \dots$) 时，出射光才为线偏振光，不过此时线偏振光的振幅和偏振方位角相对于原线偏振光已经发生了改变。

2 出射光两正交分量的远场衍射特性分析

在不考虑角锥棱镜的偏振效应情况下，出射光束的偏振态与原入射线偏振光偏振态完全一致，且振幅和位相大小均未发生变化。然而在考虑角锥棱镜的偏振效应时，出射光两正交分量相对于原入射线偏振光而言，振幅和位相均发生了变化。可以利用基尔霍夫衍射理论^[6]，分别计算 B 和 C 的远场衍射场分布。

B 分量的衍射场分布为：

$$\tilde{E}(P) = \frac{1}{i\lambda z_1} \sum_{n=1}^6 |B_n| \exp(i\delta_{B_n}) \iint_{S_n} \exp(ikr) d\delta$$

(9)

C 分量的衍射场分布为：

$$\tilde{E}(P) = \frac{1}{i\lambda z_1} \sum_{n=1}^6 |C_n| \exp(i\delta_{C_n}) \iint_{S_n} \exp(ikr) d\delta$$

(10)

式中 z_1 为接收面到角锥棱镜折射面的距离； $|B_n|$ 和 $|C_n|$ 、 δ_{B_n} 和 δ_{C_n} 分别为不同反射次序下出射光两正交分量的振幅和位相大小； $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ， λ 为入射光波的波长； S_n 为图 2 所示的各个有效反射面积； r 为 S_n 内的某点到考察点的距离； $d\delta$ 为积分面元。其中 S_n 对应的区域如表 1 所示。

表 1 S_n 对应的区域

Tab. 1 The partitions corresponding to S_n

n	1	2	3	4	5	6
Sequence of reflection	I → II → III	I → III → II	II → I → III	II → III → I	III → I → II	III → II → I
The partition in relation to S_n	123	132	213	231	312	321

本文考虑的是线偏振光垂直入射到不镀膜的口径为 40 mm 的 K9 玻璃角锥棱镜上，因而有： $n = \frac{1}{1.516} = 0.6596$ ， $\theta = \arcsin\sqrt{\frac{2}{3}}$ ，代入公式(1)，则可得： $\delta_+ = -124.625^\circ$ ， $\delta_- = -79.48^\circ$

图 3~图 8 为考虑角锥棱镜偏振效应情况下，对应于入射线偏振光不同方位角时计算机模拟的偏振衍射效果图(所有的光强分布都以理想圆孔衍射中心极大值进行归一化处理)。

(1) 入射线偏振光方位角 $\alpha=0^\circ$

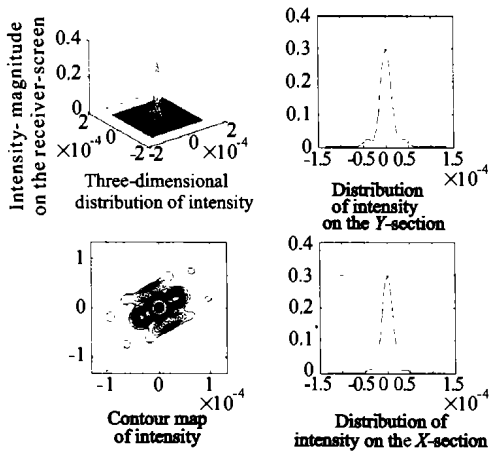


图 3 原偏振光方向分量的衍射强度分布图

Fig. 3 Distribution of intensity with diffraction pattern of the original polarization

(2) 入射线偏振光方位角 $\alpha=25^\circ$

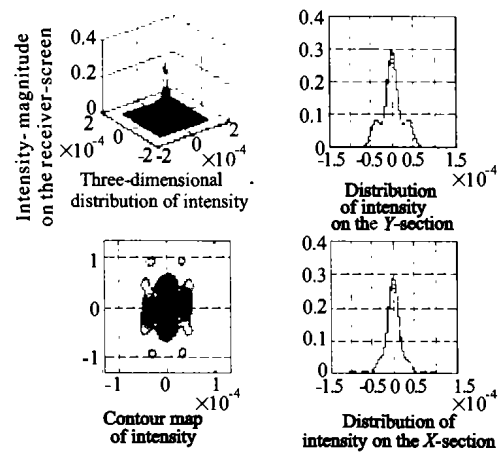


图 6 原偏振光方向分量的衍射强度分布图

Fig. 6 Distribution of intensity with diffraction pattern of the original polarization

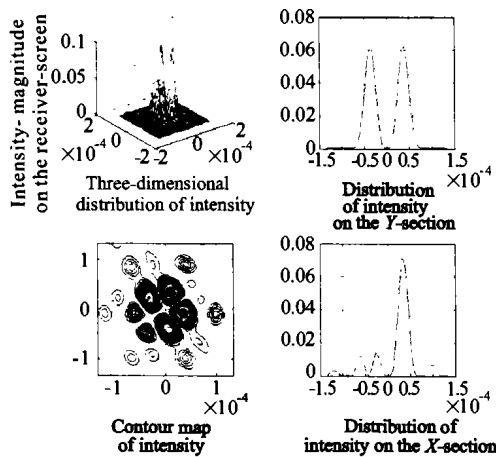


图 4 正交偏振光方向分量的衍射强度分布图

Fig. 4 Distribution of intensity with diffraction pattern of the orthogonal polarization

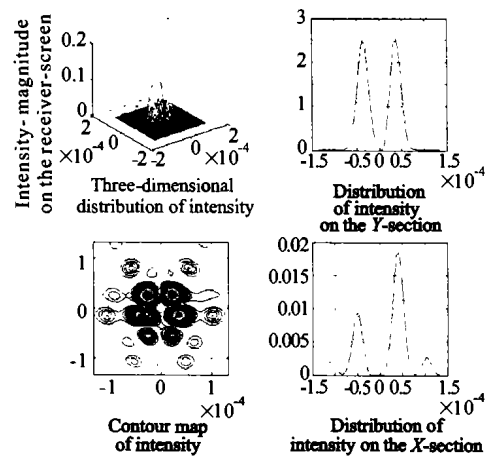


图 7 正交偏振光方向分量的衍射强度分布图

Fig. 7 Distribution of intensity with diffraction pattern of the orthogonal polarization

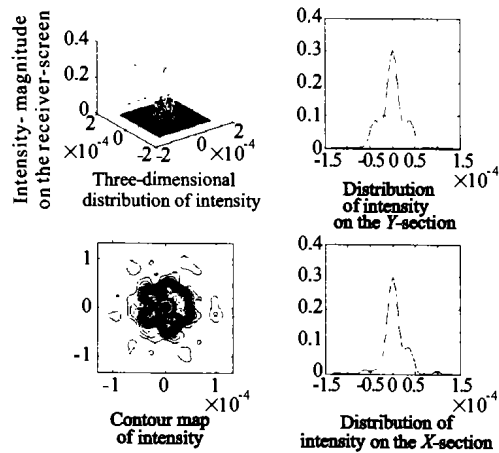


图 5 总的衍射强度分布图

Fig. 5 Distribution of total diffraction pattern

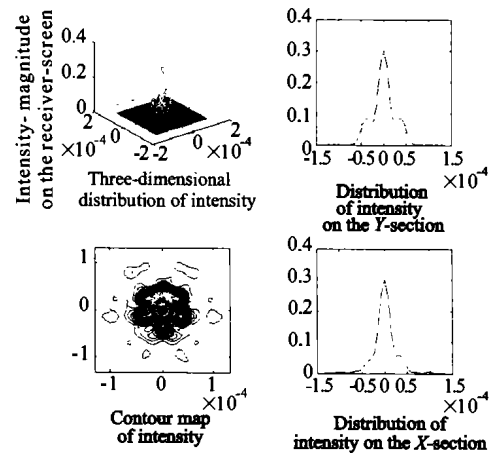


图 8 总的衍射强度分布图

Fig. 8 Distribution of total diffraction pattern

图 3~图 8 接收屏的大小都以米为单位,图 3、图 6 为平行于原入射线偏振光方向的偏振分量衍射图,图 4、图 7 为垂直于原入射线偏振光方向的偏振分量衍射图,图 5、图 8 分别为 $\alpha=0^\circ$ 与 $\alpha=25^\circ$ 时光场的衍射图。

为研究接收屏上某一固定点的强度随入射线偏振光方位角的变化,作出了如图 9 所示的曲线图。随着入射线偏振光方位角的改变,接收屏上某固定点的强度按照一定的周期发生变化。

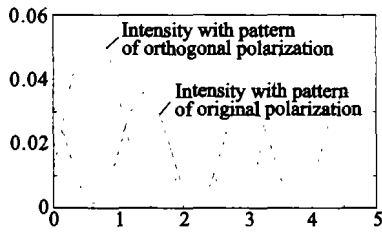


图 9 偏振光强度随方位角的变化关系曲线
Fig. 9 Relation curve between the intensity of different diffraction pattern and polar orientation

图 10 为不考虑角锥棱镜偏振效应情况下的衍射图样(所有的光强分布都以理想圆孔衍射中心极大值进行归一化处理)。

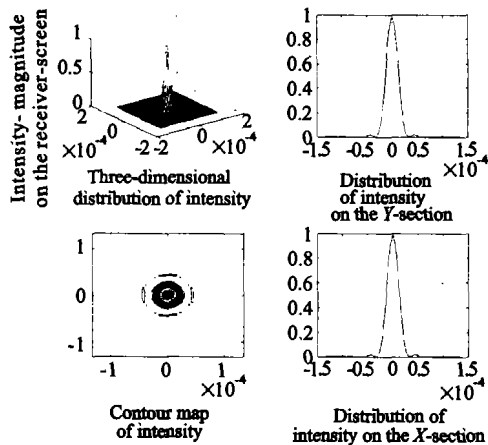


图 10 不考虑偏振效应情况下的远场衍射分布图
Fig. 10 Distribution of intensity with diffraction pattern without considering the polarization effect

比较分析图 5、图 8 与图 10 可以得出,由于出射光偏振态的改变,其衍射图样不再是简单的爱里斑,而是一个复杂的衍射图样。图 5、图 8 的强度分布比较分散,中心点的强度只是图 10 爱里斑中心点强度的 30%。

3 实验结果

为验证上述理论的正确性,搭建了实验装置,其

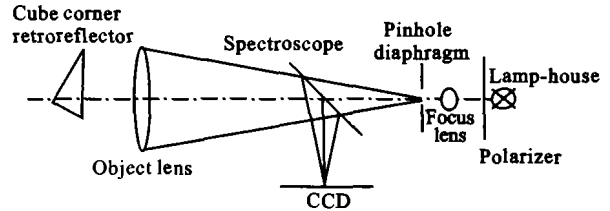


图 11 实验原理图

Fig. 11 Sketch map of experimental principle

原理如 11 所示。图中包括光源、聚光镜、针孔光阑、分光镜、物镜、角锥棱镜、CCD 探测器、起偏器。角锥棱镜安装在测试架上,通过调节测试架能保证准直光垂直入射在角锥棱镜的底面上,经角锥棱镜反射的光被透镜会聚,且在焦平面上生成光阑像。

CCD 接收到图像后,通过图像采集卡进入计算机进行处理,得到远场衍射图,如图 12~图 14 所示。



图 12 总衍射强度照片
图 13 原偏振光方向的衍射强度照片
图 14 正交偏振光方向分量的衍射强度照片

Fig. 12 Photograph of the total diffraction pattern
Fig. 13 Photograph of the component of the pattern having the original polarization
Fig. 14 Photograph of the component of the pattern having the orthogonal polarization

4 结论

在理想条件下,不考虑其三个反射面的直角误差及其面形等因素,入射光束经过三个反射面的相继反射后,六束出射光的偏振态相对原入射光偏振态均发生了改变。本文用计算机模拟了在考虑角锥棱镜偏振特性与不考虑角锥棱镜偏振特性两种情况下的远场衍射分布图,并进行了比较分析,从而可以看出,两

(下转第 431 页)

参考文献:

- [1] 沈同圣,严和平,周晓东. 海洋作战环境动态红外图像的计算机仿真[J]. 红外与激光工程,1998,27(4):9-13.
- [2] James A Buford Jr, David E King, Mark Bowden. Low cost real-time infrared scene generation for image projection and signal injection[A]. SPIE[C]. 1998. 3368. 290-299.
- [3] Onda D Simmons, Stephen E Jacobs, Robert J Makar, et al. Advancements in real-time IR/EO scene generation utilizing the Silicon Graphics Onyx2[R]. ADA378045. 2000.
- [4] Jonathan Michel, Nandhakumar N. Unified 3D models for multi-sensor image synthesis[J]. Graphical Models and Image Progressing, 1995, 57(4):283-302.
- [5] Hyun-Ki Hong, Sung-Hyun Han, Gyoung-Pyo Hong, et al. Simulation of reticle seekers using the generated thermal images [A]. IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems [C]. 1996. 183-186.
- [6] 朱文勇,高景,周刚慧,等. 舰船红外成像模拟[J]. 红外与毫米波学报,1998,17(2):129-133.
- [7] 沈同圣,熊璋,王学伟,等. 红外警戒系统视景仿真[J]. 红外技术,2000,22(6):12-16.
- [8] Tom Joyner, Keem Thiem, Richard Robinson, et al. Joint navy and air force infrared stimulator(IRSS) program installed systems test facilities(ISTFs)[A]. SPIE[C]. 1999. 3697. 11-22.
- [9] 王光银,吕进,吴振武. 热红外图象的计算机模拟[J]. 红外技术,1998,20(5):15-19.
- [10] 彭德权,周成平,丁明跃. 海空背景长波红外大气透过率的仿真计算方法[J]. 红外与激光工程,2001,30(2):112-117.
- [11] Duff J W, Gruninger J H, Sundberg R L, et al. Development of atmospheric infrared emission models. AFRL-VS-HA-TR-98-0002[R]. ADA346253. 1998.
- [12] Karen J Jefferson, Richard D Wickstrom. Simulation of a fast framing staring sensor[A]. SPIE[C]. 1998. 3377. 22-30.
- [13] 李桦,汤心溢,施家明. 红外动态景像仿真中探测器效应的研究[J]. 量子电子学报,2001,18(增):19-26.
- [14] 沈国土,杨宝成,蔡继光,等. 海面船目标红外图像的计算机模拟[J]. 红外与毫米波学报,2002,21(1):14-18.
- [15] Owen M Williams. Dynamic infrared scene projection: a review [J]. Infrared Physics & Technology, 1998, 39(7):473-486.
- [16] Pritchard A P, Balmond M D, Lake S P, et al. Design and fabrication progress in B. Ae's high-complexity resistor array IR scene projector devices[A]. SPIE[C]. 1998. 3368.
- [17] Steve Mchugh, Jon Warner, Mike Pollack, et al. MIRAGE Dynamic IR scene projector overview and status[A]. SPIE[C]. 1999. 3697.
- [18] 李守荣,梁平治. 动态红外景象产生技术[J]. 红外与激光工程,2001,30(3):184-189.

(上接第 422 页)

者的中心强度分布有较大的差别。同时,实验结果使理论分析得到了有利的证明。因而在大多数使用角锥棱镜的场合中,必须对角锥棱镜进行镀膜处理,改变出射光的偏振态,提高中心亮斑的强度以满足使用要求。本文对角锥棱镜在激光通讯、激光测距、激光器的设计制造等应用具有一定的理论指导意义。

参考文献:

- [1] 刘海宁,李真. 角锥棱镜的偏振效应[J]. 激光杂志,2000,21(1):15-16.
- [2] 王春海,吉贵军,胡小唐,等. 角锥棱镜的偏振效应[J]. 光学学报,1993,13(6):540-545.
- [3] 聂辉,翁兴涛,李松,等. 角锥棱镜的远场衍射特性[J]. 光学学报,2003,23(12):1470-1474.
- [4] 梁铨廷. 物理光学 [M]. 北京:机械工业出版社,1980. 34-35.
- [5] 徐怀方. 玻璃角锥棱镜的偏振特性[J]. 中国激光,1986,13(4):233-236.
- [6] 吕乃光. 傅里叶光学 [M]. 武汉:机械工业出版社,1987. 61-65.