

引用格式: YANG Guang, DUAN Minghui, HUI Yue, et al. Divergence Performance of Reflective Film Enhanced by Microlenses Combined with Non-standard Pyramid Structure[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(6):0622004  
杨光,段明辉,惠越,等.微透镜联合非标准角锥结构增强反光膜发散性能[J].光子学报,2022,51(6):0622004

# 微透镜联合非标准角锥结构增强反光膜发散性能

杨光<sup>1</sup>,段明辉<sup>1</sup>,惠越<sup>1</sup>,刘铠<sup>2</sup>,梁桂德<sup>2</sup>,黄志鹏<sup>2</sup>

(1 集美大学海洋装备与机械工程学院,福建 厦门 361021)

(2 福建夜光达科技股份有限公司,福建 泉州 362200)

**摘 要:**微棱镜型反光膜要求有一定的观测角,而正角锥反光膜存在大观测角亮度低的问题。解决该问题较为有效的方法是改变角锥棱镜的二面角偏差,同时叠加微透镜的结构。基于几何光学原理,理论分析了二面角偏差和透镜曲率半径对发散角的影响。针对不同角锥棱镜叠加微透镜组合结构,利用光学仿真软件,分析了微透镜的曲率半径和二面角偏差对光线发散性的影响。结果表明,随着二面角偏差的增大,偏转角线性增加;微透镜的曲率半径越小,发散角越大;使用微透镜叠加二面角偏差的角锥棱镜能实现光线非均匀发散,尤其是凹透镜+负二面角偏差角锥棱镜,或者凸透镜+正二面角偏差角锥棱镜的组合方式,可以实现光线从中心到外部连续的的非均匀发散。该研究结果可用于微棱镜反光膜的结构设计和优化。

**关键词:**几何光学;发散性能;仿真分析;反光膜;组合结构;微透镜;角锥

中图分类号:O435

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20225106.0622004

## 0 引言

在光学薄膜表面加工微细结构是提高出光效率或光线利用率的有效方法<sup>[1-5]</sup>,道路交通反光膜利用角锥阵列结构实现光线逆反射效果<sup>[6-9]</sup>。标准的角锥棱镜是实现光线原方向返回的光学元件<sup>[10-12]</sup>,然而,在实际应用中要求逆反射光线具有一定的发散角。国标 GB/T 18833-2012 明确要求高速公路反光膜有 1° 的发散角。发散角过大会降低亮度,发散角过小会限制反光膜的观测范围。在国标中要求小观测角的亮度大于大观测角的亮度,所以对于反光膜发散性的研究具有重要的现实意义。

已有的对于角锥棱镜发散性的研究主要分为两个方面。一是通过改变角锥的尺寸,利用角锥棱镜的衍射效应<sup>[13-15]</sup>增强反光膜的发散性。然而,只有当角锥尺寸小于 10 μm 才会在较大的观测角有一定的亮度,而小尺寸角锥加工难度提高,制造成本也随之提高。二是通过改变角锥结构<sup>[16]</sup>达到光线微小偏转的目的。其中,改变单一的二面角偏差<sup>[17]</sup>形成的角锥阵列可以增强特定偏转角度的光强,但在其他偏转角度的光强会显著降低。也有将不同二面角偏差的角锥叠片进行组合的方式<sup>[18-19]</sup>优化不同偏转角度的光照分布,理论上可以获得理想的光线分布和照度,但不同二面角偏差的角锥切削面临使用不同切削角的成形刀具,换刀给精确定位带来困难。在同一角锥上设置不同二面角梯度<sup>[20-21]</sup>的设计以达到实现光线发散的效果,同样存在换刀带来的定位精度难的问题。程勇<sup>[22]</sup>提出把角锥的侧面制造成曲面,从而实现光线发散的效果,但实现三个曲面加工存在一定难度。所以戚祖敏<sup>[23]</sup>提出利用凹透镜叠加角锥棱镜的方式实现光线的发散,通过控制凹透镜的曲率半径实现发散角度的控制的方法。但上述研究仅限于凹透镜,没有讨论凸透镜叠加角锥的光线反射效果,另外,二面角偏差的角锥结构可以实现反射光线的发散,已有研究中没有讨论带有二面角偏

基金项目:国家自然科学基金(No.52175407)

第一作者(通讯作者):杨光(1971—),女,教授,博士,主要研究方向为微结构光学模具精密制造。Email:yangg@jmu.edu.cn

收稿日期:2021-11-25;录用日期:2022-02-17

<http://www.photon.ac.cn>

差的角锥叠加透镜结构的反射光线发散规律。

综上所述,道路交通反光膜需要实现光线的非均匀发散,而凹透镜叠加标准角锥只能实现光线的均匀发散。如果采用单二面角偏差的结构,则需要不同二面角偏差的角锥进行组合设计。本文采用的微透镜+二面角偏差角锥的设计能简单地实现光线的非均匀发散。基于几何光学理论分析了二面角偏差和微透镜结构变化对光线发散性产生的影响,通过光学仿真软件对理论分析进行了验证,确定了微透镜叠加二面角偏差角锥的优化结构,研究对道路交通反光膜发散要求的优化设计有实际意义。

## 1 理论分析

存在二面角偏差的角锥单元中改变了三个锥面的夹角,使光束在三个锥面进行全反射的同时完成了光线的微小偏转,使光束发散成了6个子光束。通过改变二面角偏差的大小即可改变光束的发散程度。

微透镜起到将光束均匀发散的作用,标准角锥棱镜可以将光束原方向返回。如图1所示,若将微透镜与角锥棱镜进行叠加,即可以通过控制微透镜的曲率半径控制光束的发散角。

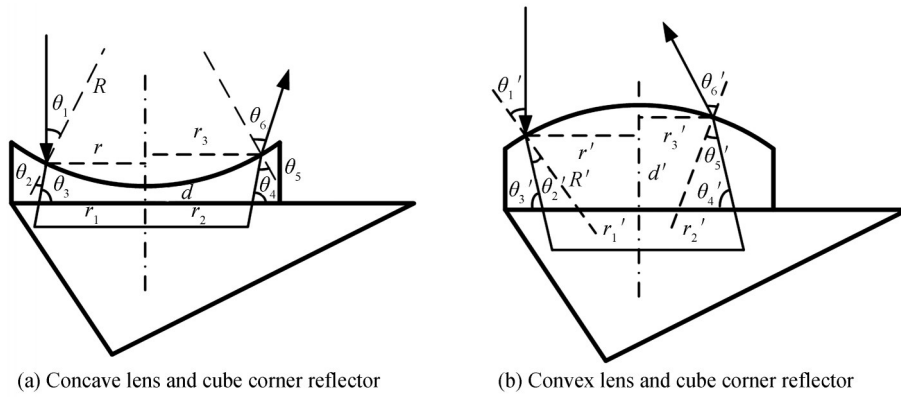


图1 微透镜+角锥棱镜光线轨迹分析

Fig. 1 Microlenses + corner cube light trajectory analysis

图1(a)中,光线通过曲率半径  $R$  的凹透镜,从距中心轴  $r$  处垂直入射,入射光线与切面法线夹角为  $\theta_1$ ,有如下关系

$$\sin \theta_1 = r/R \quad (1)$$

当其通过折射率为  $n$  的材料,折射光线与法线夹角为  $\theta_2$ ,有

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = n \quad (2)$$

折射光进入角锥平面夹角  $\theta_3$  可表示为

$$\theta_3 = \pi/2 - (\theta_1 - \theta_2) \quad (3)$$

折射光进入角锥平面距离中心轴的距离为  $r_1$ ,设凹透镜最薄处为  $d$ ,由于  $R \gg r$ ,可推出

$$r_1 \approx r + \frac{1}{n} \frac{d}{R} r \quad (4)$$

忽略透镜对光线的微小偏转,全反射光射出角锥平面距离中心轴的距离为  $r_2$ ,与平面的夹角为  $\theta_4$ , $\delta$  是由角锥棱镜的二面角偏差决定的,称之为角锥棱镜的偏转角,此处不做赘述。由角锥棱镜的全反射特性可得

$$r_1 \approx r_2 \quad (5)$$

$$\theta_4 = \theta_3 + \delta \quad (6)$$

设光线射出凹透镜距离中心轴的距离为  $r_3$ ,即

$$r_3 \approx r_2 + d \sin(\pi/2 - \theta_4) \quad (7)$$

则光线离开凹透镜的入射角  $\theta_5$  和出射角  $\theta_6$  可表示为

$$\theta_5 \approx \pi/2 - \theta_4 + \arcsin \frac{r_3}{R} \quad (8)$$

$$\sin \theta_6 \approx n \sin \theta_5 \quad (9)$$

光线发散角  $\theta$  表示为

$$\theta \approx \theta_6 - \arcsin \frac{r_3}{R} \quad (10)$$

如图 1(b)所示,当凹透镜变为凸透镜是也可以起到使光线发散的作用,同理可得

$$\sin \theta'_1 = r'/R' \quad (11)$$

$$\frac{\sin \theta'_1}{\sin \theta'_2} = n \quad (12)$$

$$\theta'_3 = \pi/2 - (\theta'_1 - \theta'_2) \quad (13)$$

当设凸透镜最厚处为  $d'$ ,此时由凸透镜的偏转特性可得

$$r'_1 \approx r' - \frac{1}{n} \frac{d'}{R'} r' \quad (14)$$

根据角锥棱镜特性同理可得

$$r'_1 \approx r'_2 \quad (15)$$

$$\theta'_4 = \theta'_3 + \delta \quad (16)$$

光线射出凸透镜,距离中心轴的距离  $r'_3$  可表示为

$$r'_3 \approx r'_2 - d' \sin(\pi/2 - \theta'_4) \quad (17)$$

同理可得

$$\theta'_5 \approx \pi/2 - \theta'_4 + \arcsin \frac{r'_3}{R'} \quad (18)$$

$$\sin \theta'_6 \approx n \sin \theta'_5 \quad (19)$$

对于凸透镜而言,光线发散角  $\theta'$  表示为

$$\theta' \approx \theta'_6 - \arcsin \frac{r'_3}{R'} \quad (20)$$

## 2 仿真结果与分析

采用光学模拟软件 Zemax 建立如图 2 所示的结构,光源为椭圆光源,光线为平行光线,光源半径设为  $75 \mu\text{m}$ 。探测器位于光源后方距离角锥棱镜的入射平面距离为  $180 \text{ mm}$ 。微透镜和角锥棱镜的材料选择为 PC 材料,折射率  $n=1.58$ 。光线分析数目为  $1 \times 10^5$  条。矩形探测器大小为  $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 。

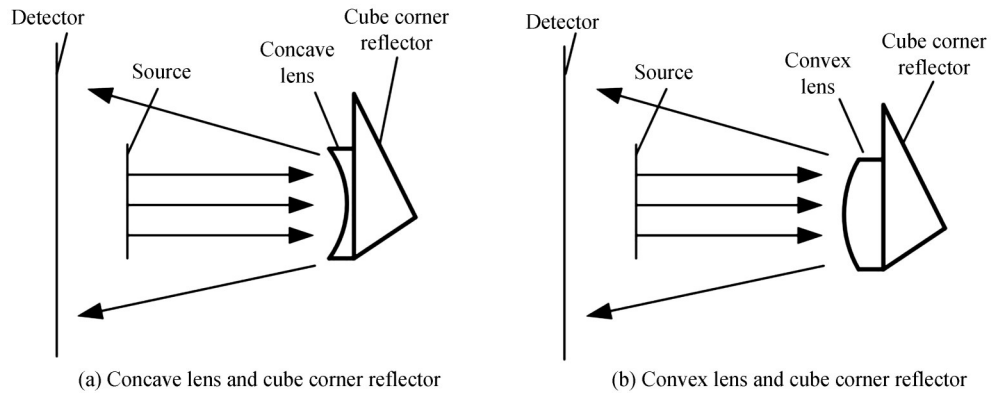


图 2 光线经微透镜叠加角锥棱镜发散示意图

Fig. 2 Schematic diagram of light divergence through the microlenses superimposed corner cube reflector

2.1 二面角偏差角锥棱镜结构分析

建立如图3所示角锥棱镜模型。底边AB、BC和AC边长为290 μm,分别过E、F和G作OA、OB和OC的垂线,则角α为面AOB与面AOC的二面角,角β为面AOB与面BOC的二面角,角γ为面AOC与面BOC的二面角。

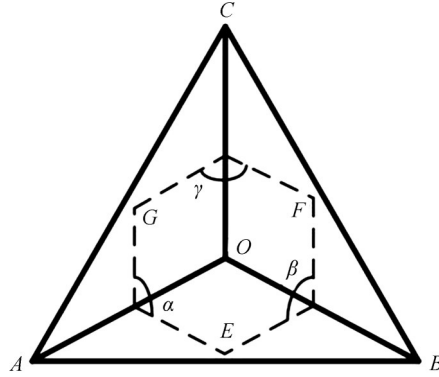


图3 角锥棱镜模型示意

Fig. 3 Schematic of the corner cube reflector model

标准角锥棱镜的二面角α,β,γ均为90°,设三个角的二面角偏差同时为η,探究二面角偏差对光线偏转角的影响。则

$$\alpha = \beta = \gamma = \pi/2 + \eta \tag{21}$$

当角锥棱镜不存在二面角偏差的时候,反射光斑计算结果如图4(a)所示,光源由中心位置射入角锥棱镜,逆反射形成的光束在探测器上也会回射回中心位置。当角锥棱镜存在二面角偏差的时候,反射光斑计算结果如图4(b)所示,一束光会发散成另外6束子光束,e为子光束距离中心位置的距离。因为6束子光束到中心距离一致,所以其偏转距离为e。由于探测器设置为距离入射平面180 mm处,相应的偏转角为δ,表示为

$$\delta = \arctan(e/180) \tag{22}$$

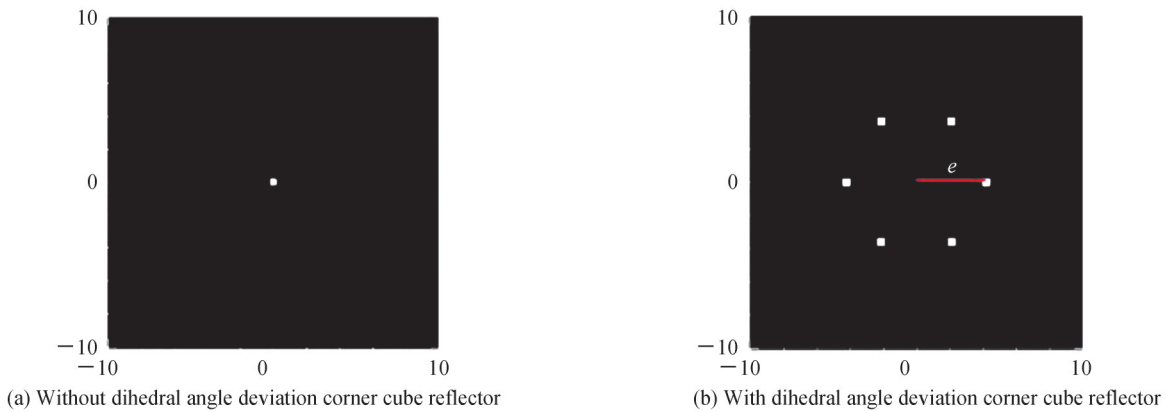


图4 不同二面角偏差角锥棱镜的反射光斑

Fig. 4 The reflected light spot of a corner cube reflector with different dihedral angle deviations

不同二面角偏差下,对于光线偏转角的变化如图5所示,黑色实线为实际变化规律曲线,红色虚线为负偏差关于x = 0的对称曲线,可以看出当二面角偏差增大时,偏转角也会随之增大,基本呈线性关系。并且二面角无论是存在正偏差或者负偏差,导致光线偏离的程度区别不大,最大偏差小于0.2 mrad。

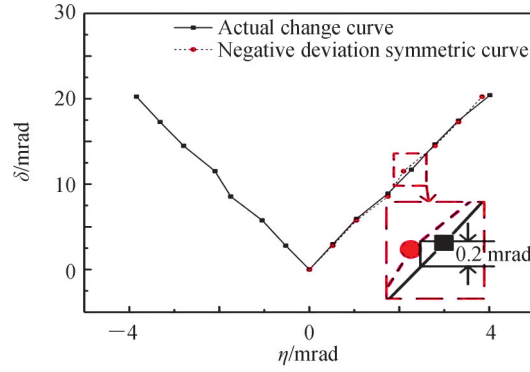


图5 二面角偏差  $\eta$  与偏转角  $\delta$  的关系

Fig. 5 The relationship between the dihedral angle deviation  $\eta$  and the deflection angle  $\delta$

### 2.2 微透镜+标准角锥棱镜结构分析

在使用单一的二面角偏差的角锥棱镜时,增大观测角的同时会降低中心区域的亮度<sup>[24]</sup>。当使用微透镜+标准角锥棱镜的组合则可以实现光束的均匀发散。如图6(a)所示,在凹透镜曲率半径  $R$  取 8 mm,二面角偏差  $\eta$  为 0 时, $a$  为扩散的光斑的直径,可以明显地看出采用微透镜+标准角锥棱镜形成的光斑可以实现光线均匀发散。图6(b)为光斑在  $x$  轴方向的归一化功率密度曲线,之所以会发生振荡是由于 zemax 中光线的数目有限导致密度分布不均匀所致。在曲线中可知  $a$  的具体数值,从而可以得出光线的发散角  $\theta$  或  $\theta'$ ,表示为

$$\begin{cases} \theta = \arctan(a/360) \\ \theta' = \arctan(a/360) \end{cases} \quad (23)$$

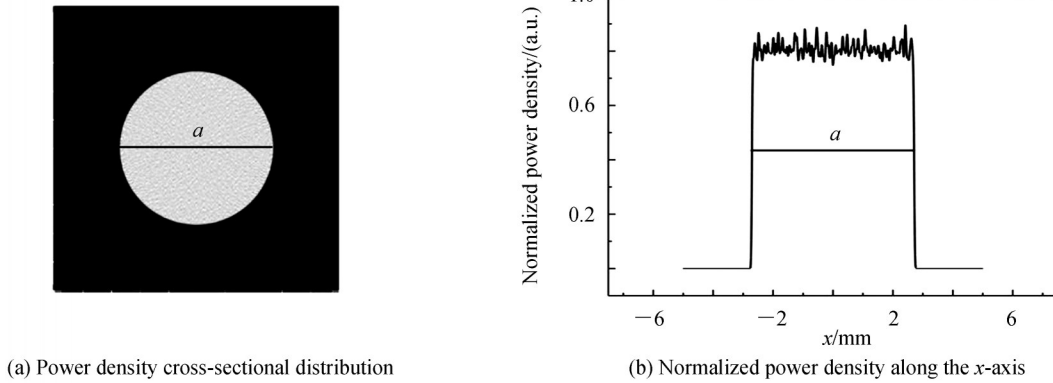


图6 微透镜+标准角锥棱镜的反射光斑和归一化功率密度

Fig. 6 Reflected spot and normalized power density of microlenses + standard corner cube reflector

在不同曲率半径的平凸透镜或平凹透镜下,光束的发散角变化如图7。图7(a)表明采用平凹透镜加标准角锥棱镜时,当曲率半径  $R < 6$  mm 时,发散角迅速降低;当曲率半径  $R > 6$  mm 时,发散角的变化趋于平缓并逐渐降低到 0。图7(b)表明采用平凸透镜加标准角锥棱镜时的变化规律,与采用平凹透镜加标准角锥棱镜时的规律一致,并且在相同曲率半径下的发散角相差小于 3 mrad。上述结果说明两者的应用效果是相同的,都可以通过改变曲率半径的大小去改变光束的发散程度。

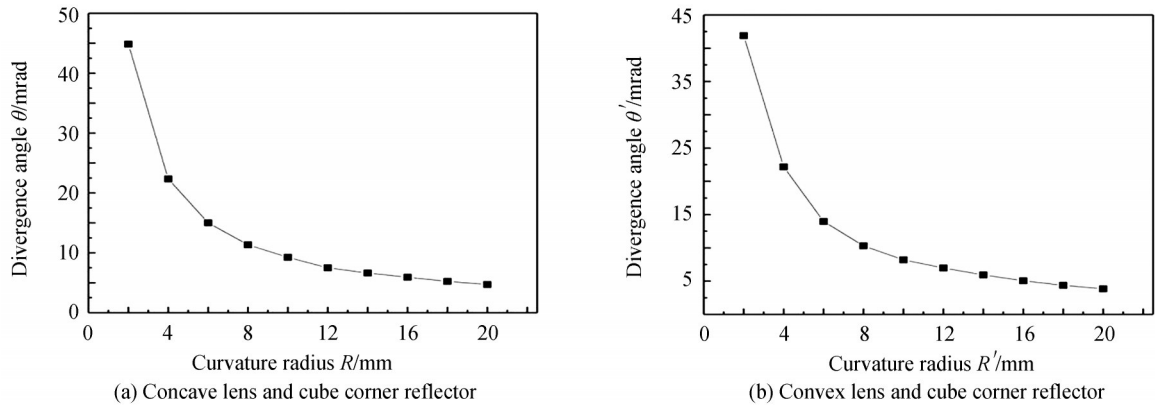


图7 透镜曲率半径与发散角的关系

Fig. 7 The relationship between the lens curvature radius and the divergence angle

### 2.3 微透镜+二面角偏差角锥棱镜结构分析

采用微透镜+标准角锥棱镜的组合可以实现光线的均匀发散,但无法满足反光膜对于不同观测角亮度不同的要求,因此需要实现光束的非均匀发散。采用微透镜+二面角偏差的角锥棱镜可以简单地实现此目的。

微透镜和角锥棱镜的四种不同组合方式的光线发散情况如图8。图8(a)为采用凹透镜( $R=5\text{ mm}$ ) + 正二面角偏差( $\eta=+2.80\text{ mrad}$ )角锥棱镜的光线发散情况,图8(b)为采用凹透镜( $R=5\text{ mm}$ ) + 负二面角偏差( $\eta=-2.80\text{ mrad}$ )角锥棱镜的发散情况,图8(c)为采用凸透镜( $R'=5\text{ mm}$ ) + 负二面角偏差( $\eta=-2.80\text{ mrad}$ )角锥棱镜的发散情况,图8(d)为采用凸透镜( $R'=5\text{ mm}$ ) + 正二面角偏差( $\eta=+2.80\text{ mrad}$ )角锥棱镜的光线发散情况。对比四种结果可知,只有采用凹透镜+负二面角偏差角锥棱镜,或者凸透镜+正二面角偏差角锥棱镜的组合方式,才能实现光线从中心到外部连续的非均匀发散。

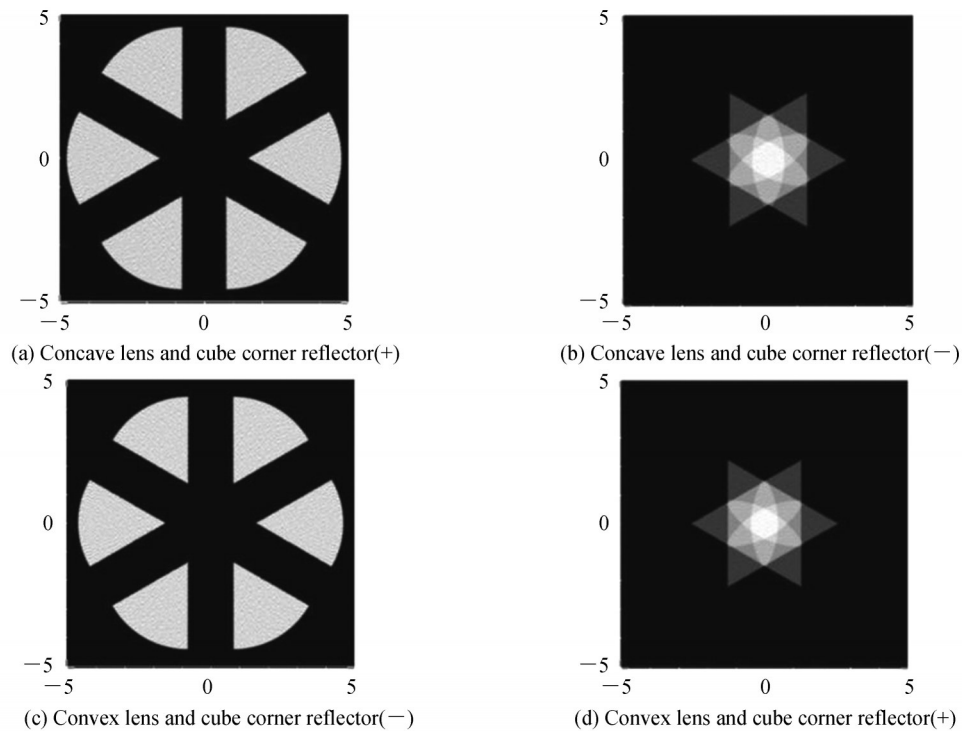


图8 不同微透镜+二面角偏差角锥棱镜组合的反射光斑

Fig. 8 The reflected light spot of different microlenses + dihedral angle deviation corner cube reflector combination

为研究不同二面角偏差对光束发散性的影响,取凹透镜的曲率半径为5 mm,研究在不同二面角负偏差下的光束发散情况。如图9所示,图9(a)、(b)和(c)显示了随着二面角偏差增大的时候,中心的六个扇形叠加区域(最亮区)是增大的。图9(d)和(e)显示,随着二面角偏差的继续增大,中心区亮度减小。当二面角偏差继续增大时,如图9(f)所示,中心开始出现暗区。总体来看,当透镜曲率半径固定时,探测器上的扩散面积是固定的,但是由于二面角偏差的变化,反射光斑分解的6个扇形开始偏离中心,随着二面角偏差的增大,偏离程度也开始增大。

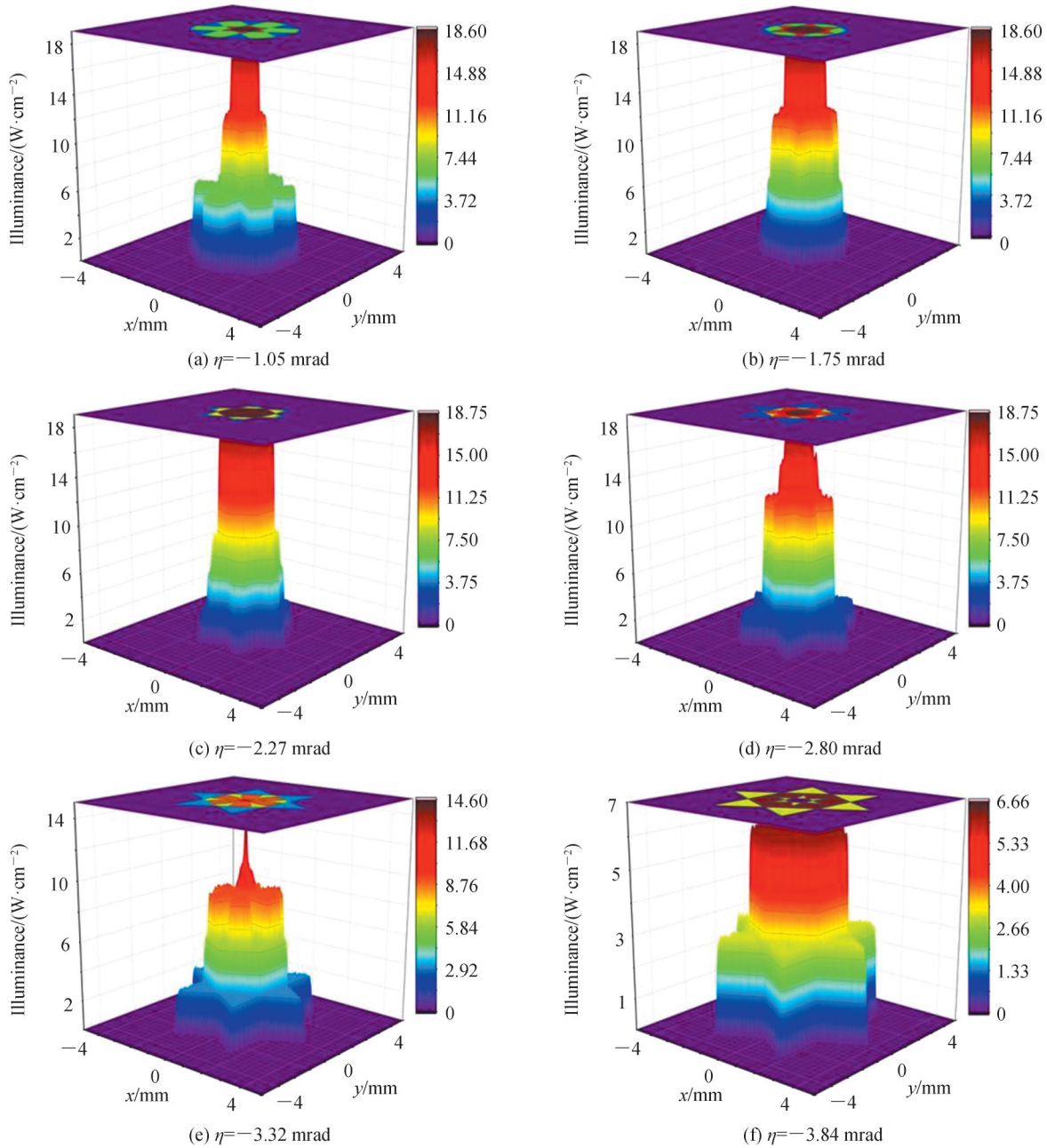


图9 不同二面角偏差组合结构的照度分布

Fig. 9 Illumination distribution of different dihedral angle deviation combination structure

不同二面角偏差结构的照度分布如图9,在输出光线能量设置为1 W时,图9(a)~(d)的峰值照度均为18.6 W/cm<sup>2</sup>。并且随着二面角偏差的增大,其保持峰值亮度的区域是从增大到一定程度就开始减小。随着二面角偏差的进一步增大,如图9(e),其峰值亮度只能达到14.6 W/cm<sup>2</sup>。这是因为随着二面角进一步增大多扇形叠加区域减小而模拟光线条数有限导致的。当二面角偏差在加大时,多扇形的叠加区域消失,所以峰

值照度只能达到如图 9(f) 的  $6.6 \text{ W/cm}^2$ 。

为研究不同曲率半径的微透镜对光源的发散性的影响,取角锥的二面角偏差  $\eta = 2.80 \text{ mrad}$ ,凹透镜不同曲率半径下光线的发散情况如图 10。从图 10(a)~(f) 可知光束会分解成 6 个扇形区域,且每个扇形的原点对照中心点的偏移量是一致的,说明了理论推导式(6)的正确性。且可以看出随着曲率半径的增加,六个扇形的总区域是变小的,符合 2.2 节的变化趋势。扇形区域扩散程度不一致导致中心亮度会不同,图 10(a) 的中心亮度会低于图 10(b) 和 (c) 的亮度。由于曲率半径和二面角偏差同时起作用,所以图 10(d)、(e) 和 (f) 中,中心亮度区域会减小,甚至变成暗区。

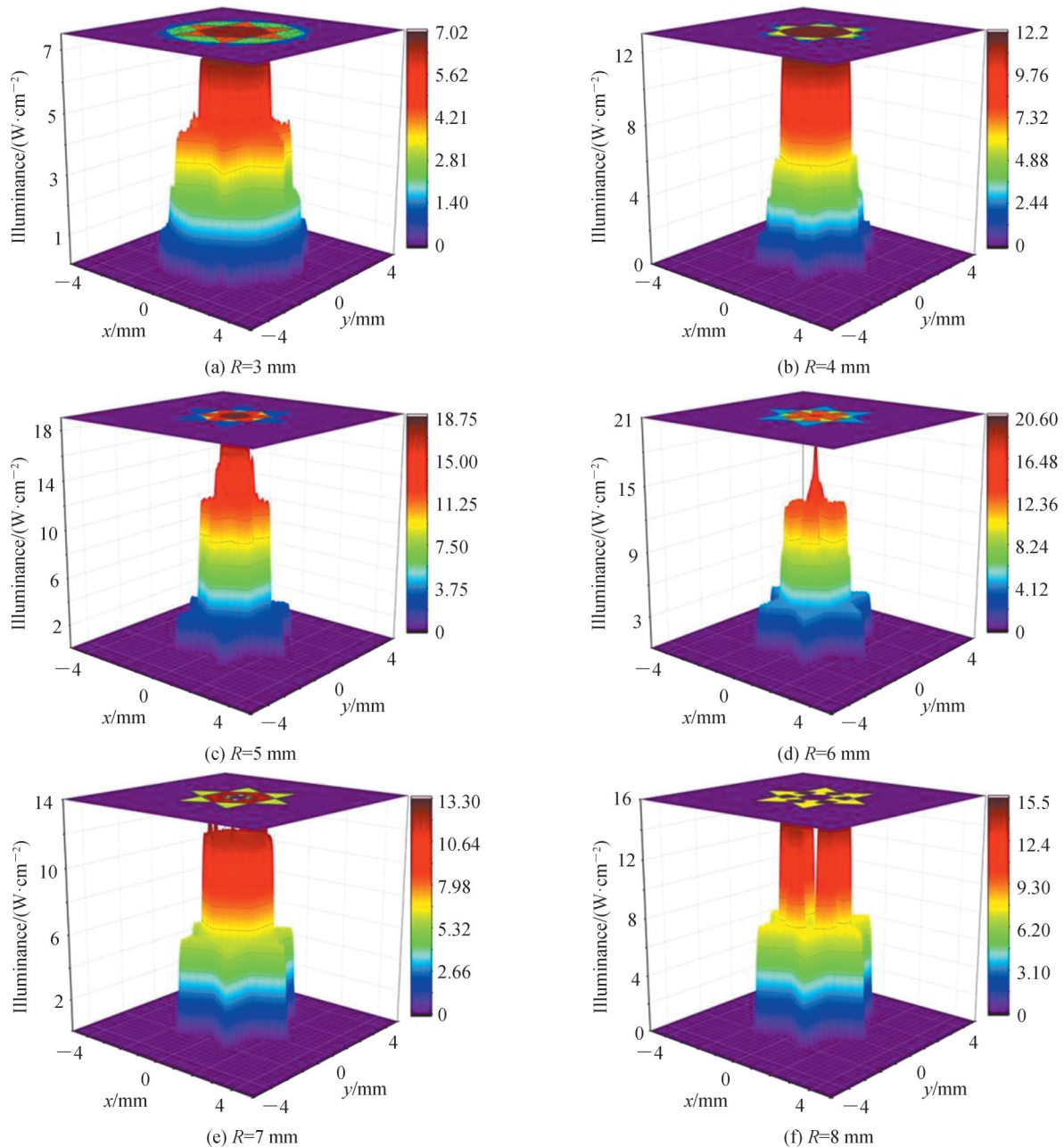


图 10 不同曲率半径组合结构的照度分布

Fig. 10 Illumination distribution of the combined structure with different radii of curvature

不同曲率半径组合结构的照度分布如图 10,在输出光线能量设置为  $1 \text{ W}$  时,图 10(a)~(f) 所示不同曲率半径下峰值照度均是不同的。如图 10(a)~(d) 所示,其峰值照度都是在中心位置,但随着曲率半径的增大,峰值照度从  $7.02 \text{ W/cm}^2$  增长到  $20.6 \text{ W/cm}^2$ ,但其保持峰值照度的范围逐渐减少。这是因为曲率半径控制整



个光束的扩散范围,随着曲率半径的增加,扩散范围变小。平均照度会变高而峰值照度范围变小,这是因为六个扇形的叠加区域变小导致的。如图10(e)所示,峰值照度为 $13.3\text{ W/cm}^2$ 且峰值不出现在中心位置,这是由于扩散范围的进一步减小,而中心叠加区域消失导致的。同理,图10(f)所示的峰值照度为 $15.5\text{ W/cm}^2$ 且不在中心位置。这说明了实现不同区域的照度分配需要综合曲率半径和二面角偏差来考虑。

综上所述,因为反光膜要求逆反射光线是靠近中心位置要亮于远离中心位置,所以需要实现光线的非均匀发散。以上分析可知曲率半径最优设计区间为 $5\sim 6\text{ mm}$ ,二面角偏差最优设计区间为 $2.80\sim 3.32\text{ mrad}$ 。

### 3 结论

本文通过研究二面角偏差的角锥棱镜和微透镜对光线发散的共同作用,得出以下结论:1)对于二面角偏差的角锥棱镜,光线会分成6束子光线射出,但不能起到扩散光线的作用,二面角偏差 $\eta$ 与偏转角 $\delta$ 呈线性关系。2)对于微透镜+标准角锥棱镜,光线会发散能起到扩散光线的作用,且随着曲率半径的增大,光束的发散角会减小。3)对于微透镜+二面角偏差角锥棱镜,优选出凹透镜和负二面角偏差角锥棱镜、凸透镜和正二面角偏差角锥棱镜这两种组合方式能实现非均匀发散。同时,曲率半径控制发散面积且最优设计区间为 $5\sim 6\text{ mm}$ ,二面角偏差控制偏转距离且最优设计区间为 $2.80\sim 3.32\text{ mrad}$ 。本文采用的设计方法可以用于各类反光膜结构设计与优化。

#### 参考文献

- [1] AHN S, CHA J, MYUNG H, et al. Continuous ultraviolet roll nanoimprinting process for replicating large-scale nano- and micropatterns[J]. Applied Physics Letters, 2006, 89(21): 213101-213103.
- [2] HUANG P H, HUANG T C, SUN Y T, et al. Large-area and thin light guide plates fabricated using UV-based imprinting[J]. Optics Express, 2008, 16(19): 15033-15038.
- [3] YAO Donggang, VIRUPAKSHA V L, KIM B. Study on squeezing flow during nonisothermal embossing of polymer microstructures[J]. Polymer Engineering and Science, 2005, 45(5): 652-660.
- [4] LI Yue, YANG Guang, DENG Dingrong, et al. Effect of chromium coating thickness on surface adhesion of polyethylene terephthalate optical film[J]. Surfaces and Interfaces, 2021, 26(10): 1042901-1042911.
- [5] DENG Yujun, YI Peiyun, PENG Linfa, et al. Experimental investigation on the large-area fabrication of micro-pyramid arrays by roll-to-roll hot embossing on PVC film[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2014, 24(4): 04502301-04502312.
- [6] GUAN Yang. Survey on improvement of visibility and significance painting measures for emergency vehicles in UK and USA[J]. Auto and Safety, 2020, 26(8): 64-72.  
官阳. 英美应急车辆视认性和显著性涂装措施改善研究概览[J]. 汽车与安全, 2020, 26(8): 64-72.
- [7] WOOD J M, MARSZALEK R, LACHEREZ P, et al. Configuring retroreflective markings to enhance the night-time conspicuity of road workers[J]. Accident Analysis and Prevention, 2014, 70(9): 209-214.
- [8] LE H, LE L, CHEN Mingjun, et al. ECE/SAE dual functional superpin plus curved reflex reflector by use of new structured corner cubes[J]. Applied Sciences, 2020, 10(2): 454-470.
- [9] JI Yun, HUANG Meizhen, LI Xia, et al. Analysis and measurement of ultra-high reflectivity retro-reflection film of micro cutting cube corner prisms[J]. Acta Photonica Sinica, 2016, 45(2): 0226001.  
季芸, 黄梅珍, 李夏, 等. 切削微角锥棱镜型超高定向反射膜的分析与测试[J]. 光子学报, 2016, 45(2): 0226001.
- [10] LUO Han, YUAN Changying. Structure optimization of retroreflective sheeting based on laminae combination technique [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(2): 224-229.  
罗汉, 袁长迎. 基于薄片组合技术的反光膜结构优化设计[J]. 中国激光, 2015, 42(2): 224-229.
- [11] YUAN Jinghe, CHANG Shengjiang, LI Sumei, et al. Design and fabrication of micro-cube-corner array retro-reflectors [J]. Optics Communication, 2002, 209(1): 75-83.
- [12] KIM H, LEE B. Optimal design of retroreflection corner-cube sheets by geometric optics analysis [J]. Optical Engineering, 2007, 46(9): 094002-094014.
- [13] TANG Kai, CHEN Zhien, DENG Huarong, et al. Study on far-field diffraction pattern of cube corner retroreflector at oblique incidence[J]. Acta Physica Sinica, 2021, 70(15): 154201.  
汤凯, 程志恩, 邓华荣, 等. 角锥棱镜的斜入射远场衍射图样[J]. 物理学报, 2021, 70(15): 154201.
- [14] NIE Hui, WENG Xingtao, LI Song, et al. The far-filed diffractive characteristics of cube-corner prism[J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(12): 1470-1474.  
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.
- [15] YUAN Jinghe, ZHANG Yanxin, WANG Yong, et al. Diffractive properties of the micro-prism retro-reflectors [J].

- Journal of Optoelectronics Laser, 2001, 12(1): 30-33.
- 袁景和, 张延焯, 王勇, 等. 微角锥棱镜阵列回归反射器衍射特性[J]. 光电子·激光, 2001, 12(1): 30-33.
- [16] PI Jun, LU Hui, JIANG Tao, et al. Influence of geometry structure of microstructure on reflective characteristics of the micro-prism film in the nonplanar state[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(3): 0308001.  
皮钧, 卢辉, 姜涛, 等. 微棱镜反光膜非平面状态下微结构几何结构改变对反光特性的影响[J]. 光子学报, 2021, 50(3): 0308001.
- [17] ZHOU Xiaofeng, QI Zumin, LUO Xiangqian, et al. A method to diverge reflect beam uniformly using cube-corner retroreflector array with dihedral angle tolerances[J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(8): 084201.  
周晓凤, 戚祖敏, 罗向前, 等. 利用含二面角误差的角锥棱镜阵列实现反射光束均匀发散的方法[J]. 物理学报, 2017, 66(8): 084201.
- [18] ROGER H, JOHN C, MARK E, et al. Cube-corner retroreflective articles having tailored divergence profiles: US4775219[P]. 1988-10-04.
- [19] SIDNEY A, ANTHONY J, LIVIU A, et al. Retroreflective articles having a microcube, and tools and methods for forming a microcube: US6015214[P]. 2000-01-18.
- [20] IKUO M, CHIHIRO H, KEIJI A. Triangular pyramid type cube corner retroreflection article, and its manufacturing method: US8459806[P]. 2013-06-11.
- [21] LU Xiaojing, GAUER G, JACOB D, et al. Prismatic retroreflector having a multi-plane facet: US0141060[P]. 2002-10-03.
- [22] CHENG Yong, LIU Yang, XU Lixin, et al. Mutual-injection phase-locking fiber laser with corner-cube cavity [J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(1): 77-81.  
程勇, 刘洋, 许立新, 等. 角锥腔互注入锁相光纤激光器[J]. 中国激光, 2009, 36(1): 77-81.
- [23] QI Zumin, ZHOU Xiaofeng, ZHU Jianguo, et al. Method to diverge reflected beam using planoconcave len and normal cube-corner prism[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(11): 277-283.  
戚祖敏, 周晓凤, 朱建辉, 等. 利用平凹透镜和标准角锥棱镜实现反射光束发散的方法[J]. 光学学报, 2016, 36(11): 277-283.
- [24] YANG Yuchuan, LUO Hui. Backward diffractive characteristics analysis of cube corner prism by Zemax[J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(3): 491-495.  
杨雨川, 罗晖. 角锥棱镜后向衍射特性的 Zemax 分析[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(3): 491-495.

## Divergence Performance of Reflective Film Enhanced by Microlenses Combined with Non-standard Pyramid Structure

YANG Guang<sup>1</sup>, DUAN Minghui<sup>1</sup>, HUI Yue<sup>1</sup>, LIU Kai<sup>2</sup>, LIANG Guide<sup>2</sup>, HUANG Zhipeng<sup>2</sup>  
(1 College of Marine Equipment and Mechanical Engineering, Jimei University, Xiamen, Fujian 361021, China)  
(2 Fujian Yegood Technology Co., Ltd., Quanzhou, Fujian 362200, China)

**Abstract:** There are higher requirements for various properties of optical films with the increasing maturity of the manufacturing process of polymer surface microstructures. The road traffic reflective film uses the pyramid array structure to achieve the effect of light retroreflection. Therefore, the simulation to design the pyramid structure is the important significance for shortening the product development cycle and saving costs using the computer. A standard pyramid prism (with an angle of 90° between surfaces) is an optical structure element that can return light rays along the incident direction. In practical application, microprism reflection film requires a certain observation angle (divergence angle) and requires that the brightness decrease from the center of the optical axis to the edge. However, the standard pyramid prism reflective film can not meet the requirement of large viewing angle brightness. The research on the divergence of pyramid prisms can be divided into two aspects. One is to enhance the divergence of the reflective film by changing the size of the pyramid prism. However, only when the size of the pyramid is less than 10 μm, it will have a certain brightness at the larger observation angle, and the manufacturing cost of the pyramid with a small size will increase as the processing difficulty increases. Another method is to achieve the purpose of light deflection by changing the pyramid structure. Among them, the pyramid array formed by changing a single dihedral angle deviation (non-standard pyramid) can enhance the light intensity at a specific deflection angle, but significantly reduce the light intensity at other deflection angles. In addition,

the ideal light distribution and illumination can be obtained theoretically by combining the pyramidal laminates with different dihedral angle deviations to optimize the light distribution at different deflection angles. However, the angle cutting with different dihedral angle deviation faces the use of forming tools with different cutting angles, and the tool change brings difficulties to precise positioning. The design of setting different dihedral angle gradients on the same cone to achieve the effect of light divergence also has the problem of difficult positioning accuracy brought by tool change. The light beam can be distributed uniformly or non-uniform by using the pyramid with dihedral angle deviation, and the premise is to combine the pyramid with different dihedral angle deviations. The lens can realize the divergence of light because the radius of curvature of the lens controls the diffusion range of the whole beam. With the increase of the radius of curvature, the diffusion range becomes smaller, the average illuminance becomes higher, and the peak illuminance becomes smaller. The concave lens can achieve uniform divergence of light rays, but can not achieve non-uniform divergence. The non-uniform divergence can be easily realized by superimposing microlens and dihedral angle deviation pyramid structures. In this paper, the influence of dihedral angle deviation and lens curvature radius on divergence angle is analyzed theoretically based on the geometrical optics principle. The divergence of light rays is analyzed by using optical simulation software according to the combination of the microlenses and pyramidal structure with different geometric parameters. The results show that the deflection angle increases linearly with the increase of dihedral angle deviation. The divergence angle increases with the decrease of the curvature radius of the microlenses. Non-uniform divergence of light rays can be realized by using microlenses superimposed with dihedral angle deviation. The combination of the concave lens and negative dihedral angular deviation prism, or convex lens and positive dihedral angular deviation prism, can realize the continuous non-uniform divergence of light rays from the center to the outside. The optimal design interval of the curvature radius is determined to be 5~6 mm, and the optimal design interval of dihedral angle deviation is determined to be 2.80~3.32 mrad through the simulation calculation. The above research results can be used for the structural design and optimization of micro prism reflective film.

**Key words:** Geometrical optics; Divergent performance; Simulation analysis; Reflective film; Composite structure; Microlenses; Pyramid

**OCIS Codes:** 220.2740; 230.4000; 310.6860