

# 基于 TracePro 的开放型高反射回归器件的研究

付秀华<sup>1</sup>, 马国俊<sup>1\*</sup>, 吕景文<sup>2</sup>, 刘冬梅<sup>1</sup>, 张静<sup>1</sup>, 赵迪<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;

<sup>2</sup> 长春理工大学材料科学与工程学院, 吉林 长春 130022

**摘要** 为了提高开放型回归器件在 808 nm 波长处的反射性能, 分析了玻璃微珠折射率对定向回归反射的影响。利用光学仿真软件 TracePro 对具有 3 种不同折射率(1.93、2.00 和 2.20)的回归反射器件结构单元(玻璃微珠)的回归反射性能进行模拟分析, 得到了光线垂直入射时采用普通基底的传统开放型回归器件结构单元的理论反射率仅为 23.6%, 采用高反射基底时, 理论最高反射率可达 98.1%, 回归器件的反光性能提高了 3 倍。在 808 nm 波长处制备了反射率为 99.3% 的高反射光学薄膜, 并在镀有此高反射光学薄膜的基底上制备了高反射回归器件。分别对使用两种基底的回归器件进行测试, 结果表明, 在高反射基底上使用折射率为 1.93 的玻璃微珠制成的回归器件具有最佳的回归反射率, 光线垂直入射时的回归反射率可达 46.2%。

**关键词** 薄膜; 定向回归反射; 几何光学; 仿真; 玻璃微珠

中图分类号 O484

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.1131003

## Open-Type Retro-Reflectors with High Reflectivity Using TracePro

Fu Xiuhua<sup>1</sup>, Ma Guojun<sup>1\*</sup>, Lü Jingwen<sup>2</sup>, Liu Dongmei<sup>1</sup>, Zhang Jing<sup>1</sup>, Zhao Di<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

<sup>2</sup> School of Materials Science and Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

**Abstract** Herein, to improve the reflectivity of open-type retro-reflectors at 808-nm wavelength, the impact of glass micro-beads' refractive index on the retro-reflection is theoretically analyzed. The optical simulation software TracePro is used to simulate and analyze the performances of three retro-reflector's structural units (glass micro-beads) with different refractive indexes (1.93, 2.00, and 2.20). The theoretical reflectivity of the conventional open-type retro-reflector's structural unit on the ordinary substrate is only 23.6% when the light is perpendicularly incident, however its theoretical maximum reflectivity is enhanced by 3 times, reaching 98.1%, when a high-reflectivity substrate is used. A high-reflectivity optical film having a reflectivity of 99.3% is designed and fabricated at 808-nm wavelength, and a retro-reflector on the substrate coated with such high-reflectivity optical film is prepared. Retro-reflectors using these two types of substrates are experimentally evaluated, and the results demonstrate that the glass micro-beads with the refractive index of 1.93 on the high-reflectivity substrate provide the best retro-reflectivity. At vertical incidence, the retro-reflectivity value of the retro-reflector on the high-reflectivity substrate reaches 46.2%.

**Key words** film; directional retro-reflection; geometric optics; simulation; glass micro-bead

**OCIS codes** 310.1515; 310.6845; 310.6870

## 1 引 言

定向回归反射是一种反射光线沿入射光线逆方向平行返回的光学现象。定向回归反射器件被广泛应用于高等级公路标识牌、交通安全标志以及机动

车辆反光标识上<sup>[1-5]</sup>。玻璃微珠因具有有效反射角大、透明性好、成本低、密度和折射率波动范围小等特点, 常被作为回归反射器件元件。

吕虎等<sup>[6]</sup>提出了二次彩虹测量法, 采用 3 种不同波长的激光对玻璃微珠折射率进行测量; Yuan

收稿日期: 2019-07-01; 修回日期: 2019-07-14; 录用日期: 2019-07-24

基金项目: 吉林省重大科技攻关专项(20190302095GX)

\* E-mail: maguojunfilm@126.com

等<sup>[7]</sup>基于玻璃微珠定向回归反射原理对玻璃微珠的逆反射方向特性进行了研究,结果表明,玻璃微珠的反射方向特性因折射率的不同而不同;季芸等<sup>[8]</sup>在分析切削微角锥棱镜型反射膜的基础上设计了测试定向回归反射率的测量系统;顾侃等<sup>[9]</sup>利用高斯光束对玻璃微珠的后向散射进行了研究分析。目前,国内外回归反射器件的研究主要集中在对回归反射元件的分析上。高反射性能回归器件的研究具有重要价值,但此方面的研究鲜有报道。本文在理论上利用光学软件模拟了玻璃微珠结构单元在 808 nm 波长处的回归反射性能,以及微珠色散对回归光线张角的影响,研制出了对 808 nm 波长激光具有高回归反射性能的回归器件。

## 2 理论分析

玻璃微珠具有球形透镜的光学特性,入射光线在玻璃微珠界面经过两次折射和一次反射后,一部分出射光与入射光以相反的方向逆向平行射出,光路如图 1 所示, $i$  为光线入射角, $n_0$  为入射介质的折射率, $n$  为玻璃微珠的折射率。

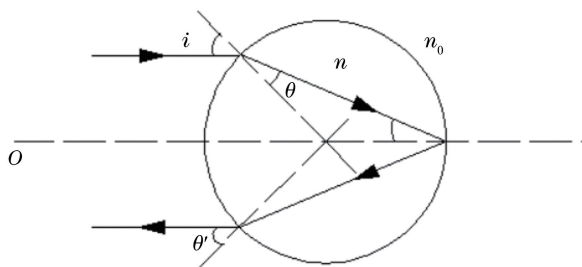


图 1 玻璃微珠的定向回归反射原理

Fig. 1 Principle of directional retro-reflection of glass micro-bead

为了研究适用于回归反射的最佳玻璃微珠的折射率,利用几何光学中近轴光线经过单个球面时的折射理论<sup>[10]</sup>进行讨论。如图 2 所示, $r$  为玻璃微珠的半径, $l_1$ 、 $l_2$  分别为物方和像方截距。规定光线从左向右为正方向,以  $O_1$ 、 $O_2$  为前后顶点。由近轴光线球面折射公式可得

$$\frac{n}{l_2} - \frac{n_0}{l_1} = \frac{n - n_0}{r} \quad (1)$$

由于入射光为平行光,故  $l_1$  趋于  $\infty$ , (1) 式可化为

$$l_2 = \frac{rn}{n - n_0} \quad (2)$$

由此可见,近轴光线平行光束经前表面折射后的成像焦点与  $n$ 、 $r$  和  $n_0$  有关。

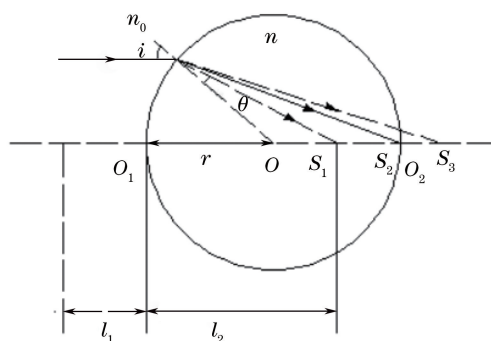


图 2 玻璃微珠近轴光线折射光路

Fig. 2 Refracting path of paraxial light in glass micro-bead

玻璃微珠型定向回归反射器件可分为开放型和埋入型两种,开放型相比埋入型具有更高的回归反射性能,其截面图如图 3 所示。此时,入射介质为空气, $n_0=1$ ,入射光线经过第一个折射球面成像于后顶点  $O_2$  ( $S_2$ ) 处时,近轴光线实现定向回归反射,此时  $l_2=2r$ ,得到玻璃微珠的理论折射率  $n=2$ 。

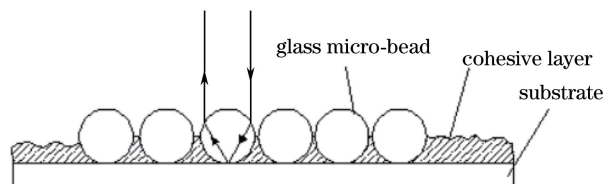


图 3 玻璃微珠开放型回归反射器件的截面图

Fig. 3 Cross section of open-type retro-reflector with glass micro-bead

为分析折射率为 2.00 的玻璃微珠在 808 nm 波长处的回归反射特性,建立开放型回归器件的玻璃微珠结构单元,采用光学仿真软件 TracePro 对 3 种不同折射率(1.93、2.00 和 2.20)的玻璃微珠结构单元进行模拟验证。

## 3 模拟仿真

### 3.1 玻璃微珠结构单元回归反射特性的模拟分析

TracePro 是一款基于蒙特卡罗法的非序列光线追迹仿真软件,在光学分析、照明系统、光度分析和辐照度分析中的应用很广泛<sup>[11]</sup>,具有强大的光学分析功能,可定义和追踪数百万条光线,并可对所需要的光线进行追踪和准确分析。

本文采用 TracePro 软件对玻璃微珠结构单元的回归反射特性进行建模仿真。将单个玻璃微珠作为结构单元,玻璃微珠位于  $Z$  轴的正半轴,设置结构单元为直径  $30 \mu\text{m}$  的球形透镜,设置其材料为光学玻璃,并假设材料无吸收;设置入射光源为位于坐标原点  $(0,0,0)$  处的圆形格点光源,并沿  $Z$  轴正半轴方向入射。在光源的正后方设置一个大小为

4 mm×4 mm 的接收面,接收面的表面特性设置为完全吸收,用于接收从结构单元反射回来的光线,接收面的初始坐标设为(0,0,-5),其位置可根据不同的分析进行调整。结构模型如图 4 所示。

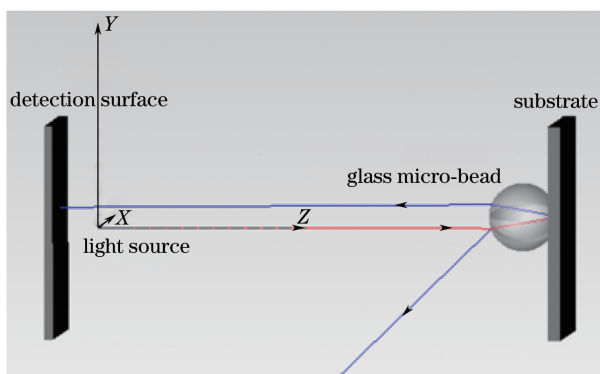


图 4 玻璃微珠结构单元的模拟模型

Fig. 4 Simulation model of structural unit of glass micro-bead

当光线入射到两种不同折射率界面时,会发生菲涅耳反射,由菲涅耳公式可得 s 波和 p 波的反射率  $R_s$ 、 $R_p$  随入射角度的变化关系为

$$\begin{cases} R_s = r_s^2 = \left( \frac{n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} \right)^2 \\ R_p = r_p^2 = \left( \frac{n_2 \cos \theta_1 - n_1 \cos \theta_2}{n_2 \cos \theta_1 + n_1 \cos \theta_2} \right)^2 \\ R = \frac{1}{2} (R_s + R_p) \end{cases}, \quad (3)$$

式中: $\theta_1$  为入射角,即  $i$ ;  $\theta_2$  为折射角;  $r_s$ 、 $r_p$  为 s 波和 p 波的反射振幅系数。在  $\theta_1 < 45^\circ$  的区域内,自然光的反射率几乎不变,近似等于正入射值<sup>[12]</sup>,正入射时的反射率为

$$R = \left( \frac{n - 1}{n + 1} \right)^2, \quad (4)$$

式中: $n = n_1/n_2$ ,  $n_1$ 、 $n_2$  分别为玻璃微珠和空气的折射率。一般情况下,入射介质为空气,即  $n_2 = 1$ 。计算得到的不同折射率微珠表面的反射率如表 1 所示。

表 1 不同折射率玻璃微珠的表面反射率

Table 1 Surface reflectivity of glass micro-beads with different refractive indexes

$n$	$R$
1.93	0.101
2.00	0.111
2.20	0.141

实验中选取波长为 808 nm 的激光进行模拟分

析。玻璃微珠结构单元的回归反射率用探测面所接收的回归光通量与总发射光通量的比值来表征,表 2 为在 808 nm 波长处模拟得到的 3 种折射率玻璃微珠在普通基底(反射率为 10%)上的回归反射率随入射角度的变化情况。光线入射角度和玻璃微珠折射率是影响结构单元回归反射性能的主要因素,在光线垂直入射时,折射率为 2.20 和 1.93 的微珠的理论回归反射率分别为 23.6% 和 17.6%,在相同入射角下回归反射率随玻璃微珠折射率的增大而增大。

表 2 不同折射率的普通基底玻璃微珠在不同入射角下的理论回归反射率(波长 808 nm)

Table 2 Theoretical retro-reflectivity of glass micro-beads with different refractive indices on ordinary substrate at different incident angles (wavelength is 808 nm)

$n$	Theoretical retro-reflectivity / %		
	$0^\circ$	$5^\circ$	$30^\circ$
1.93	17.6	7.49	7.49
2.00	19.1	8.05	8.05
2.20	23.6	9.55	5.48

折射率为 1.93 和 2.00 的玻璃微珠在入射角为  $30^\circ$  时的回归反射率分别为 7.49% 和 8.05%,而折射率为 2.20 的玻璃微珠由于微珠色散对光线偏折效应的存在,回归反射率仅为 5.48%。这表明,当折射率不变时,回归反射率随着入射角的增大而逐渐减小。折射率为 2.00 的玻璃微珠在入射角为  $0^\circ$  和  $15^\circ$  时的回归光线反射照度图如图 5 所示,其中  $W$  为辐射通量, $X$ 、 $Y$  为照度图的横、纵坐标。

为增大回归反射率,可以考虑在玻璃微珠后表面镀制高反射光学薄膜,但是适合用于回归器件的微珠大小在 30~85  $\mu\text{m}$  之间,微珠尺寸太小会导致在后表面镀制高反射光学薄膜极其困难。为了提高回归反射率同时简化微珠后表面镀膜这一复杂工艺,可以选择在回归反射器件基底上镀制高反射光学薄膜,通过增大基底的反射率来提高回归器件的反射性能。

当模拟结构单元采用高反射基底(反射率为 99%)时,回归反射率随入射角的变化如表 3 所示,对比两种不同基底下结构单元的回归反射率可以看到,高反射基底下玻璃微珠结构单元在相同的入射角内拥有更高的回归反射率;当光线正入射时,3 种折射率玻璃微珠的回归反射率都在 97% 以上,折射率为 2.00 的玻璃微珠回归反射率为 97.90%,是普

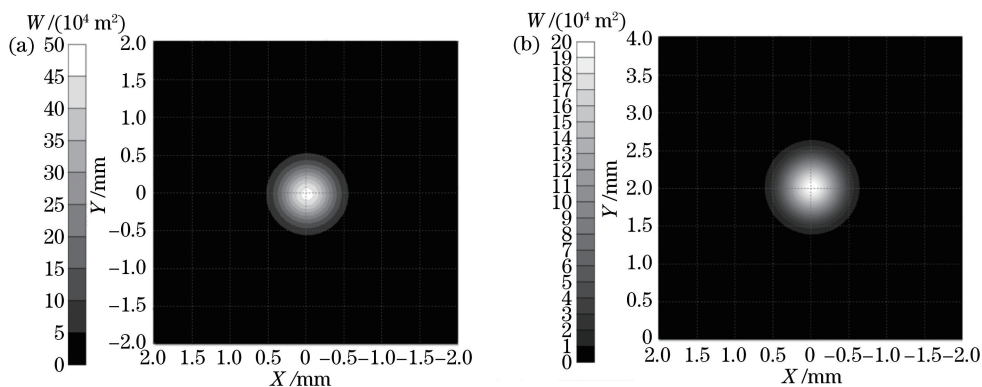


图 5 普通基底上折射率为 2.00 的玻璃微珠的反射光线照度图。(a)入射角为 0°;(b)入射角为 15°  
Fig. 5 Reflecting illuminance of glass micro-bead with refractive index of 2.00 on ordinary substrate.

(a) Incident angle of 0°; (b) incident angle of 15°

通基底的 5.1 倍;当入射角为 30°时,折射率为 2.20 的玻璃微珠的回归反射率为 73.10%,而此时普通基底的回归反射率仅为 5.48%。这表明,模拟结构单元采用高反射基底不仅影响结构单元的回归反射率,还会对回归光线的分布有一定影响。当入射角为 30°时,折射率为 2.00 的玻璃微珠的回归反射率为 78.20%,其照度图如图 6 所示。

### 3.2 玻璃微珠散射效应对回归光线的影响

玻璃微珠散射效应的存在使得回归光线偏离光轴分布在一个很广的范围内。根据文献[13]的研究可知,当入射角确定时,玻璃微珠回归光线张角只与折射率  $n$  有关。通过前面的模拟可知,当入射角和折射率不变时,结构单元基底反射率的大小不仅影响回归反射性能,还会对回归反射光线的分布产生一定影响。

为分析基底反射率对回归光线张角的影响,对折射率为 1.93 的结构单元再一次进行模拟。改变入射角度,记录每次反射光斑在探测面内的位置,以

回归反射光线光斑位于探测面理想位置上方为正,下方为负,得到两种基底回归反射光线偏离程度随入射角度的变化情况,如图 7 所示。可见,回归反射光线偏离光轴的距离随入射角度的增大而增大;高反射基底回归光线光斑偏离理想位置的距离远小于普通基底;当入射角不超过 30°时,高反射基底结构单元回归反射光线具有良好的回归反射性能。

表 3 不同折射率的高反射基底玻璃微珠在不同入射角下的理论回归反射率(波长为 808 nm)

Table 3 Theoretical retro-reflectivity of glass micro-beads with different refractive indices on high-reflectivity substrate at different incident angles (wavelength is 808 nm)

$n$	Theoretical retro-reflectivity / %			
	0°	5°	30°	45°
1.93	98.10	88.01	80.01	65.50
2.00	97.90	78.20	78.20	58.20
2.20	97.30	73.10	73.10	42.70

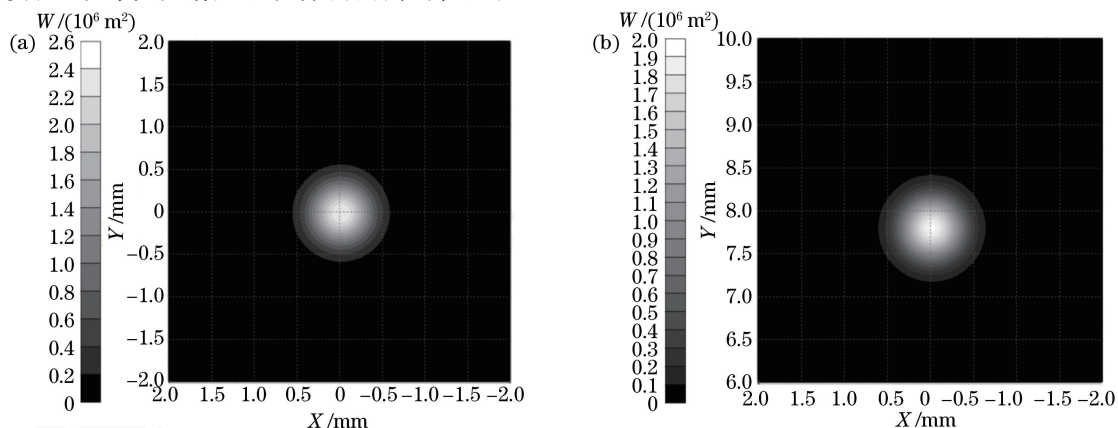


图 6 高反射基底上折射率为 2.00 的玻璃微珠的反射光线照度图。(a)入射角为 0°;(b)入射角为 30°  
Fig. 6 Refracting illuminance of glass micro-bead with refractive index of 2.00 on high-reflectivity substrate.

(a) Incident angle of 0°; (b) incident angle of 30°

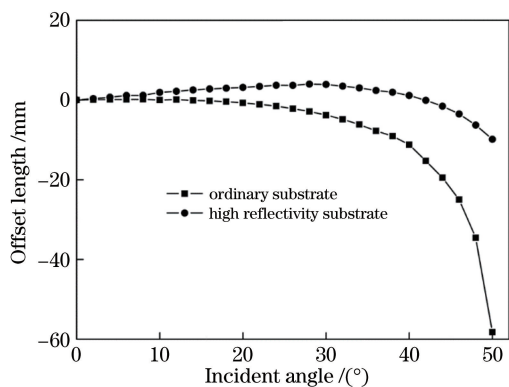


图 7 回归反射光斑位置随入射角度的变化曲线  
Fig. 7 Position of retro-reflective spot as a function of incident angle

## 4 高反射基底的研究与回归器件的制备

### 4.1 膜系设计

与介质膜相比,金属膜具有反射带宽、成本低、制备工艺简单等优点<sup>[14]</sup>,因此本文从光学薄膜理论出发,对具有高反射率的金属薄膜进行研究。高反射基底的技术参数如表 4 所示。

表 4 高反射基底的技术参数

Table 4 Technical parameters of high-reflectivity substrate

Parameter	Specification
Substrate	Al
Wavelength /nm	808
Reflectance /%	≥99

以铝板为基底时,高纯度表面很容易被氧化,而且表面粗糙度较大,为此先镀制一定厚度的铝膜来平滑基底。但是铝膜在空气中很容易被氧化而导致反射效果变差,因此在铝膜上镀制一层介质膜,这样既可以保护铝膜不被空气氧化,又能够提升铝膜的反射性能。此时,(3)式中  $n_1$  为复折射率,即  $n = n_1 - ik$  ( $k$  为消光系数)。当光从空气中垂直入射时,反射率为<sup>[15]</sup>

$$R = \left| \frac{1 - (n - ik)}{1 + (n - ik)} \right|^2 = \frac{(1 - n)^2 + k^2}{(1 + n)^2 + k^2} \quad (5)$$

如果在金属膜上镀折射率为  $n_1$  及  $n_2$  的两层  $\lambda_0/4$  厚的介质膜,其中  $n_2$  为靠近铝膜层一侧,则膜面的光学导纳变为

$$y = (n_1/n_2)^2 (n - ik), \quad (6)$$

从而新的反射率变为

$$R = \left| \frac{1 - y}{1 + y} \right|^2 = \frac{\left[ 1 - \left( \frac{n_1}{n_2} \right)^2 n \right]^2 + \left( \frac{n_1}{n_2} \right)^4 k^2}{\left[ 1 + \left( \frac{n_1}{n_2} \right)^2 n \right]^2 + \left( \frac{n_1}{n_2} \right)^4 k^2} \quad (7)$$

由(7)式可知,如果  $n_1/n_2 > 1$ ,则交替镀制折射率低、高的介质膜可以增大铝膜的反射率。选择高折射率材料  $Ti_3O_5$  和低折射材料  $SiO_2$  作为介质膜材料,通过膜系设计软件可以得到单层铝膜和加介质膜后的光学特性曲线,如图 8 所示。

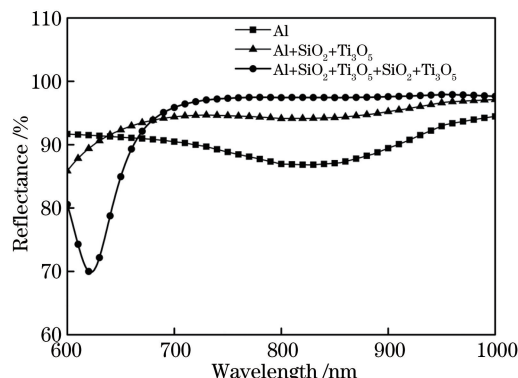


图 8 单层铝膜和铝+介质膜光谱反射率的对比  
Fig. 8 Comparison between spectral reflectivities of single-layer aluminum film and aluminum+dielectric films

为方便制备,采用规整膜系,利用膜系软件进行设计,得到最终的膜系为 Substrate|Al L H L H L H L H L|Air,设计结果如图 9 所示,在 700~900 nm 波段,平均反射率大于 99.2%,在 808 nm 处的反射率可达 99.5%。

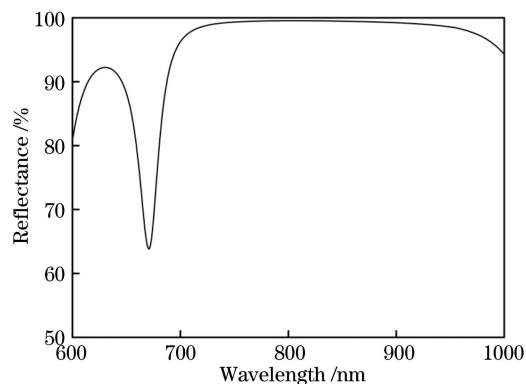


图 9 反射率理论设计曲线

Fig. 9 Theoretically designed curve of reflectivity

### 4.2 薄膜的制备与测试

采用 ZZS700-II 型箱式真空镀膜机制备薄膜,该设备配有双 e 型电子枪,采用霍尔离子源进行辅助沉积,并配有 IC/5 膜厚监控系统。将处理过的纯度为 99.99% 的铝丝悬挂在钨丝上面阻蒸加热;介质膜采用电子束蒸发方式制备。实验中,为增加铝膜的附着力,当本底真空达到  $1.0 \times 10^{-3}$  Pa 时,先打开离子源轰击基片 15 min,不加温沉积铝膜。为防止后续沉积介质膜充氧时铝膜被氧化,沉积完铝膜后冷镀一层低折射率的  $SiO_2$  薄膜,然后再加温镀制后

续介质膜。具体蒸镀工艺参数如表 5 所示。

表 5 Al、Ti<sub>3</sub>O<sub>5</sub>、SiO<sub>2</sub> 的蒸镀工艺参数

Table 5 Parameters of evaporation process for AL, Ti<sub>3</sub>O<sub>5</sub>, and SiO<sub>2</sub>

Material	Substrate temperature / °C	Degree of vacuum / Pa	Evaporation rate / (nm · s <sup>-1</sup> )	Flow rate of O <sub>2</sub> / (mL · min <sup>-1</sup> )
Al	Unbaked	1.0 × 10 <sup>-3</sup>	2.3	0
Ti <sub>3</sub> O <sub>5</sub>	250	1.5 × 10 <sup>-2</sup>	0.3	22
SiO <sub>2</sub>	250	1.0 × 10 <sup>-2</sup>	0.7	20

使用 UV-3150 型分光光度计测试实验样品的光谱曲线,结果如图 10 所示。可以看出,实际测试反射光谱与理论光谱存在一定差异。制备过程中铝膜的实际折射率低于理论值,从而产生了误差,但在 808 nm 处的反射率大于 99.36%,可以满足使用要求。

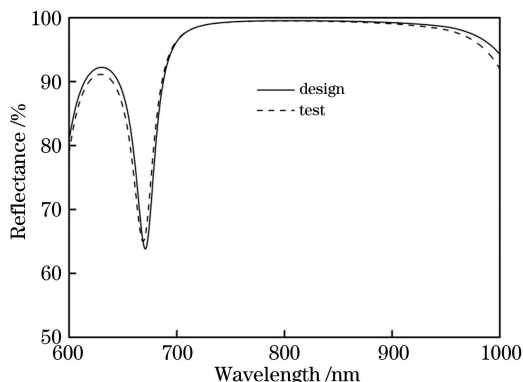


图 10 反射率理论设计曲线与测试曲线的对比

Fig. 10 Comparison between theoretically designed and tested curves of reflectivity

考虑到回归反射器件的应用环境,对薄膜样品进行了牢固度测试和耐高低温测试。

1) 牢固度测试:使用 3M 胶带对薄膜样品进行牢固度测试,结果如图 11 所示,无脱膜现象。

2) 耐高低温实验:将薄膜样品分别放置于 -40 °C 的低温和 60 °C 高温环境中各 5 h,膜层未产生脱膜、裂膜等现象。

### 4.3 回归反射器件的制备和测试

在以上高反射光学薄膜基底的基础上,采用常用的喷涂法<sup>[16]</sup>制备回归器件,采用黏结性能好、耐高低温、收缩率小且透过率高的紫外固化光学光敏胶来固定玻璃微珠。先用离心旋转甩胶法将光学胶均匀地涂覆在高反射基底上,然后喷涂玻璃微珠,得到开放型回归反射器件,如图 12 所示。在不同入射角下采用波长为 808 nm 的半导体激光器测得回归反射率数据如表 6、7 所示。

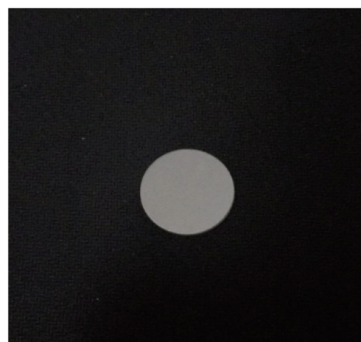


图 11 牢固度测试结果

Fig. 11 Firmness testing result



图 12 高反射基底样品在白炽灯下的反光情况

Fig. 12 Reflections of sample of high-reflectivity substrate illuminated by incandescent lamp

表 6 不同折射率的普通基底玻璃微珠在不同入射角下的实际测量回归反射率(波长为 808 nm)

Table 6 Actually measured retro-reflectivity of glass microbeads with different refractive indices on ordinary substrate at different incident angles (wavelength is 808 nm)

n	Measured retro-reflectivity / %		
	0°	5°	30°
1.93	12.8	6.7	0
2.00	10.6	4.4	0
2.20	9.3	3.7	0

表 7 不同折射率的高反射基底玻璃微珠在不同入射角下的实际测量回归反射率(波长为 808 nm)

Table 7 Actual measured retro-reflectivity of glass microbeads with different refractive indices on high-reflectivity substrate at different incident angles (wavelength is 808 nm)

n	Measured retro-reflectivity / %			
	0°	5°	30°	45°
1.93	46.2	40.1	25.5	11.7
2.0	43.8	36.8	16.5	4.5
2.2	37.8	19.2	7.3	0

从表 6、7 可以看出:折射率为 1.93 的玻璃微珠制成的器件具有较好的回归反射性能,光线正入射时,高反射基底下折射率为 1.93 的回归器件的反射率为 46.2%,是普通基底(反射率为 12.8%)的 3.6 倍;高反射基底回归器件在入射角为 30°时,反射率下降至 25.5%左右,而普通基底入射角为 30°时无反射率存在;实际制备的回归反射器件的光学性能的变化趋势与仿真结果变化一致。普通基底回归反射器件相比于高反射基底受入射角度的影响更大,高反射基底在较大入射角范围内具有良好的回归反射率。可见,高反射基底对回归反射率和回归光线的分布均有很大的提高作用。

实际得到的回归器件的反射率低于模拟值,主要与玻璃微珠自身的缺陷和喷涂工艺有关。实验所用玻璃微珠并不是完全的球体,存在一定的椭球率,会使入射光线偏离光轴,从而影响回归反射率。喷涂法得到的回归器件存在玻璃微珠喷涂不均匀的情况,如图 13 所示,重叠在一起的玻璃微珠使入射光线在内部来回反射而导致回归反射率下降。

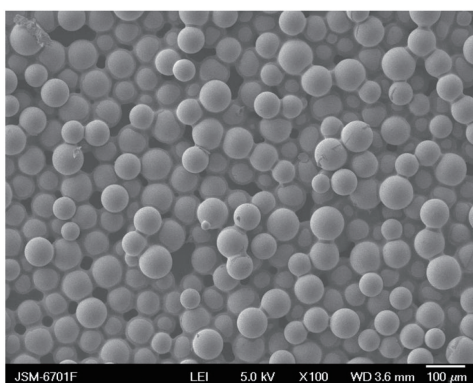


图 13 玻璃微珠样品的扫描电镜图

Fig. 13 Scanning electron microscope image of samples of glass micro-beads

## 5 结 论

本文从理论分析、仿真模拟和实验三方面对开放型回归器件的光学性能进行了分析与讨论,制备了高反射金属薄膜,并在两种不同的基底上制备了 3 种折射率微珠回归器件。与普通基底回归器件相比,高反射基底回归器件在反射率、回归光线张角等方面均具有很大优势,在高反射回归器件领域具有广阔的前景。

## 参 考 文 献

- [1] Wang Y W, Zhang Q, Li X F, *et al.* Study on structural selection of traffic marking reflective film in desert Gobi area[J]. Highway, 2016, 61(11): 240-243.
- 王瑶文, 张琪, 李先锋, 等. 荒漠戈壁地区交通标志反光膜结构选型研究[J]. 公路, 2016, 61(11): 240-243.
- [2] Zhou Q. Study on the safety technical of urban underground traffic space [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2015: 49-68.
- 周茜. 城市地下交通空间安全技术研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2015: 49-68.
- [3] Zhang J, Ma C N, Ma L, *et al.* Effects of cultivation measures such as rain shelter and film mulching on fruit quality of pickled plum[J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2017, 58(10): 1776-1778, 1788.
- 张杰, 马常念, 马良, 等. 避雨覆膜等栽培措施对桃李果实品质的影响[J]. 浙江农业科学, 2017, 58(10): 1776-1778, 1788.
- [4] Yuan J H, Emura K, Farnham C. Geometrical-optics analysis of reflective glass beads applied to building coatings[J]. Solar Energy, 2015, 122: 997-1010.
- [5] Liu Y. Application of the reflective material on urban traffic sign[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012: 32-46.
- 刘勇. 城市交通标志反光材料应用研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012: 32-46.
- [6] Lü H, Li D H, Bo J K, *et al.* Dispersion characteristic and its effect of high refractive index glass beads[J]. Acta Photonica Sinica, 2012, 41(1): 61-66.
- 吕虎, 李大海, 薄健康, 等. 高折射率玻璃微珠色散特性及影响[J]. 光子学报, 2012, 41(1): 61-66.
- [7] Yuan J H, Emura K, Sakai H, *et al.* Optical analysis of glass bead retro-reflective materials for urban heat island mitigation[J]. Solar Energy, 2016, 132: 203-213.
- [8] Ji Y, Huang M Z, Li X, *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): 0224003.
- 季芸, 黄梅珍, 李夏, 等. 切割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): 0224003.
- [9] Gu K, Hou K L, Shen J Q. Measurement and analysis on backward scattering of microparticles illuminated by Gaussian beam[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(9): 0904003.
- 顾侃, 侯科良, 沈建琪. 高斯光束照射下微米颗粒的后向散射测量与分析[J]. 中国激光, 2019, 46(9):

- 0904003.
- [10] Zhang Y M. Applied Optics [M]. 3rd ed. Beijing: Publishing House of Electronics industry, 2008: 15-25.  
张以谟. 应用光学 [M]. 3 版. 北京: 电子工业出版社, 2008: 15-25.
- [11] Wang Y, Chen P, Gong C, *et al.* Design and simulation of optical path for collecting the fluorescence signal based on TracePro software [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(11): 1117001.  
王岩, 陈平, 龚诚, 等. 基于 TracePro 软件的荧光信号光收集光路的设计与仿真 [J]. 光学学报, 2018, 38(11): 1117001.
- [12] Liang Q T. Physical optics [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2012: 22-29.  
梁铨廷. 物理光学 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2012: 22-29.
- [13] Wang B L. Theoretical study of retroreflection of a minim glass bead [J]. Acta Optica Sinica, 1998, 18(6): 693-699.  
王柏庐. 微玻璃球回归反光条件的理论分析 [J]. 光学学报, 1998, 18(6): 693-699.
- [14] Sun M Z, Wang T T, Wang Y C, *et al.* Research development of high reflecting coating for large-diameter mirror [J]. Chinese Optics, 2016, 9(2): 203-212.  
孙梦至, 王彤彤, 王延超, 等. 大口径反射镜高反射膜研究进展 [J]. 中国光学, 2016, 9(2): 203-212.
- [15] Tang J F, Gu P F, Liu X. Modern optical thin film technology [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006: 96-113.  
唐晋发, 顾培夫, 刘旭. 现代光学薄膜技术 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2006: 96-113.
- [16] Rao H Q, Han J. Production of highlight reflective fabric with transfer method [J]. Dyeing & Finishing, 2015, 41(18): 19-23, 55.  
饶海青, 韩君. 高亮反光布的转移法加工技术 [J]. 印染, 2015, 41(18): 19-23, 55.