

梯度折射率微球回归反射材料的研究*

易佑民¹ 俞 强¹ 石市委¹ 杨 群¹ 章于川² 夏 茹²

(1 安徽大学物理与材料科学学院,合肥 230039)

(2 安徽大学化学化工学院,合肥 230039)

摘 要 提出一种回归反射面材的新结构,以梯度折射率微球代替传统的超高折射率匀质玻璃微球.利用四阶 Runge-Kutta 方法进行光线追迹的理论计算,确定了制作新型回归反射面材的工艺参数.结果表明,按此条件制作回归反射面材可大幅度降低原先对折射率的过高要求,并显著提高回归反射的性能.

关键词 回归反射;梯度折射率;聚合物;微球;光线追迹;Runge-Kutta 方法

中图分类号 O435.1 **文献标识码** A

0 引言

回归反射(Retro-reflection)是指在一定入射范围内,反射光线基本上沿入射光的反方向返回的特殊光学现象^[1,2].当一束光投射到回归反射材料上时,反射光可逆着入射方向在很小锥角内返回.且当入射光方向在较大范围变化时,仍能保持此特性.此类回归反射材料在公共安全、交通警示等领域已有广泛的应用.目前,常用的回归反射材料是由大量直径几十到几百微米、一侧表面涂有反射膜的均匀玻璃微球排列而成的.这种匀质玻璃微球的基材必须有较高的折射率,当折射率高达 1.90 左右时才能有较好的回归反射性能.制作这类回归反射材料成本高、难度大,且仅依靠球体表面的折、反射作用,回归反射性能难以提高.若用梯度折射率(Gradient Index,GRIN)微球制作回归反射材料,由于光线在 GRIN 材料中沿曲线前进,可加强光线的变向作用,有望降低对折射率的过高要求,降低成本,并提高回归反射性能.

1 均匀玻璃微球的回归反射性能

图 1 是均匀玻璃微球的回归反射原理图.由于

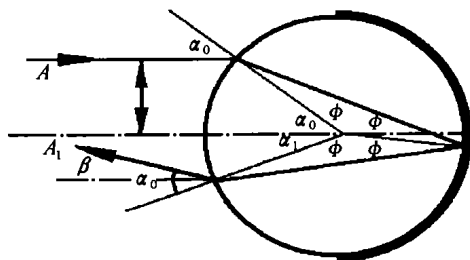


图 1 匀质微球回归反射原理
Fig. 1 Schematic diagram of retro-reflection in homogeneous micro-sphere

微球的直径仅为数十到数百微米,在实际应用中,投射光线可视为从无限远处入射,将入射光线视为平行光束.为了便于分析,本文取微球半径 r_0 为单位 1,光线的约化入射高度 h/r_0 可直接简记为 h ,出射光线与入射光线反方向的夹角记作 β ,可用 $h \sim \beta$ 的关系图来表征微球的回归反射性能.

平行于光轴的某条光线 A 在一定高度 h 入射到折射率为 n 的匀质微球表面时,入射角 $\alpha_0 = \arcsin(h/r_0) = \arcsin h$.此光线在界面折射进入球内,折射角为 ϕ ,经对侧球面反射涂层反射,出射光线 A_1 与入射光线反方向的夹角为 β .为讨论方便,规定反射点落在光轴下方的光线 β 角取正值.

根据菲涅耳定律,并考虑到光的可逆性和球内图形的对称性,得

$$\phi = \arcsin(\sin \alpha_0 / n) = \arcsin(h/n) \quad (1)$$

$$\alpha_1 = 2\pi - \alpha_0 - 2(\pi - 2\phi) = 4\phi - \alpha_0 \quad (2)$$

$$\beta = \alpha_0 - \alpha_1 = 2\alpha_0 - 4\phi = 2\arcsin h - 4\arcsin(h/n) \quad (3)$$

由此可得不同折射率条件下 $h \sim \beta$ 的关系如图 2,图中从上到下各曲线对应匀质微球的折射率依次是: 1.95、1.90、1.80、1.75、1.65 和 1.50.

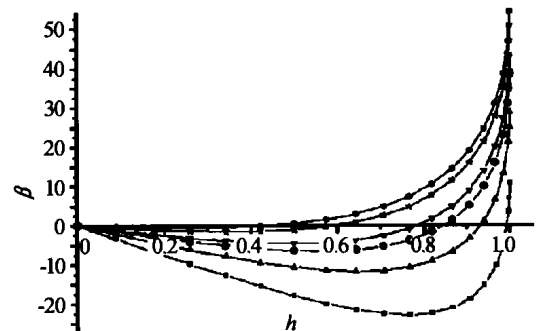


图 2 匀质微球的回归反射性能
Fig. 2 Retro-reflection performance of homogeneous micro-sphere

由图可知:当匀质玻璃球的折射率在 1.85~1.95 之间时,约化高度在 0~0.7 范围的人射光线经过

*安徽省教育厅重点科研课题(2002KJ029ZD)资助项目
Tel:0551-5107609 Email:yym@ahu.edu.cn
收稿日期:2005-02-16

球体反、折射后, 将大致沿光轴的逆向返回, 偏向角 β 在 5° 以内. 而离光轴较远的光线偏向角将急剧变大, 严重偏离光轴. 当 $n = 1.90$ 左右时, 回归反射性能最佳: 入射约化高度在 $0 \sim 0.643$ 范围时, 出射光线偏向角较小, 回归反射性能较好, β 角在 1.5° 以内; 入射约化高度在 $0 \sim 0.76$ 范围之内(占微球截面积的 58%) 时, 反射光基本上集中在 β 角为 5° 的光锥范围之内有效回归. 但当入射约化高度大于 0.76 之后, 光线偏折得非常厉害, 夹角急剧增大到数十度, 这部分光线对回归反射就几乎没有贡献了.

2 一种具理想回归反射性能的 GRIN 理论模型 Luneburg 球透镜

在梯度折射率光学里有一种经典模型—Luneburg 球透镜^[3], 其折射率分布是

$$n(r) = \sqrt{2 - \left(\frac{r}{a}\right)^2} \quad (4)$$

它有一种奇特的光学性能: 任一束平行光入射到这种 GRIN 分布的球面上都可以锐聚焦于球体另一侧表面的一点^[3]. 考虑到球形器件的对称性和光路的可逆性, 若在该透镜的背光面镀上强反射膜, 即可构成绝对理想的回归反射器件——使任意入射的平行光束严格逆向返回.

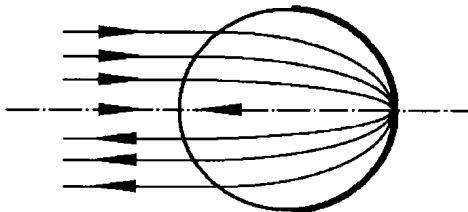


图 3 Luneburg 透镜的回归反射
Fig. 3 Retro-reflection of Luneburg lens

但是, Luneburg 球透镜模型要求球体的折射率从球心的 $\sqrt{2}$ 连续过渡到球面的 1, 折射率总差值高达 0.41 以上, 在目前科技水平下, 制作这样的微球透镜是不可能的. 因此可以说该模型仅有理论上的意义, 尚无实际应用的可能. 不过, 以上分析显露出梯度折射率介质的潜能, 它提示我们: 如果不追求“绝对”理想, 而是现实地发挥 GRIN 介质的优越性, 用其改善回归反射材料的光学性能是有可能的.

3 GRIN 微球用作高性能回归反射材料的研究

我课题组前期已用悬浮扩散共聚法成批制备 GRIN 聚合物微球^[4,5]. 用此法制备梯度折射率聚合物微球, 具有成本低、污染小、工艺简单、易于批量生产等优点. 对所得微球折射率分布进行的测量, 结果大致可用下列多项式来表示

$$n(r) = n_0 - (3.79716r^2 - 7.28103r^4 + 7.23674r^6 - 2.75287r^8) \Delta n \quad (5)$$

用 GRIN 微球代替匀质微球制作回归反射材料, 光线传播的路径大致仍如图 1, 但光线在球内的轨迹则应是弯曲的, 遵循 GRIN 介质中的光线微分方程

$$\frac{d}{ds} \left(n \frac{dr}{ds} \right) = \nabla n \quad (6)$$

由于对一般 GRIN 分布光线微分方程无法给出光线轨迹的解析解, 故本工作采用四阶 Runge-Kutta 方法进行光线追迹, 通过数值求解研究 GRIN 微球回归反射材料的性能, 所用计算公式可参阅文献[6,7].

3.1 固定中心折射率、改变折射率差值的优化计算

将中心折射率固定为 1.4885, 改变球心至球面的折射率差值 Δn , 通过光线追迹对 GRIN 微球回归反射材料的性能作严格理论计算, 部分结果如图 4. 图中七条曲线表示在不同折射率差值 Δn (从下到上为: 0.0085, 0.017, 0.08, 0.10, 0.11, 0.12, 和 0.14) 条件下, 出射光线偏向角 β 与入射约化高度 h 之间的关系.

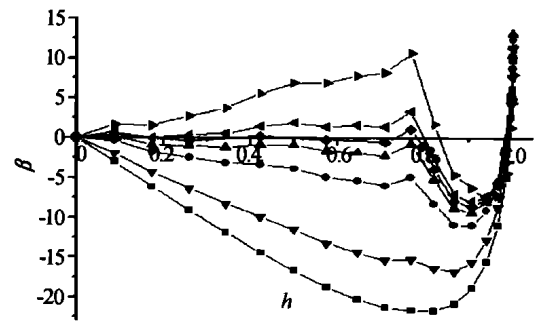


图 4 不同折射率差值下 $h-\beta$ 关系
Fig. 4 Relationship of $h-\beta$ at different Δn

由图可知, 在中心折射率固定为 1.4885 这样较低数值时, 随着 Δn 的增大, 材料的回归反射性能逐渐改善. 但当 Δn 超过一定数值后回归反射性能反而急剧下降. 故在所约定的梯度分布曲线形状下, 存在着一个最佳的 Δn 数值: 0.11, 此时回归反射性能曲线相对最好.

图 5 将这条相对最好的曲线(曲线 3)与匀质球

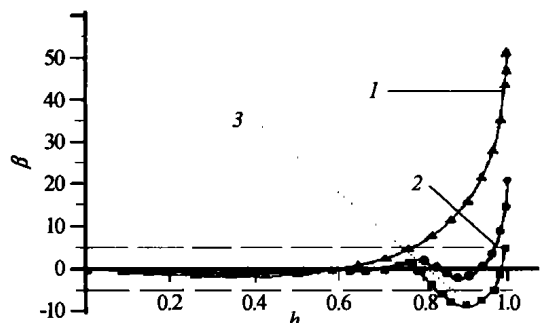


图 5 均匀球与 GRIN 球回归反射的性能比较
Fig. 5 Retro-reflection performance of homogeneous micro-sphere and GRIN micro-sphere

回归反射材料最佳性能曲线(曲线1;即图3中最佳性能曲线)进行了比较.对于曲线3:入射约化高度在0~0.78范围以内的入射光线均能以极小的偏转角返回, β 角不超过 1° ;入射约化高度在0~0.83范围以内(占微球截面积的69%)的逆反射光集中在 β 角为 5° 的光锥之内.即使入射约化高度继续增大,出射光线虽稍有发散,但没有发生急剧偏转.对约化高度在0~0.998范围以内(占微球截面积的99.6%)的所有入射光线,出射偏转角 β 都没有超出 8.6° .

比较可见,曲线3的性能比曲线1有明显改善.考虑到这种改善是在大幅度降低对材质折射率数值过高要求的前提下获得的,其积极意义就更加突出.但是,曲线3要求GRIN微球有较大的折射率差值 Δn ,而当前实现0.11的 Δn 值在技术上也还有一定困难.因此,适当提高中心折射率,同时尽可能降低对 Δn 值的要求就应是一种合乎逻辑的选择.

3.2 同时改变中心折射率和折射率差值的双重优化计算

我们利用光线追迹法,在保持折射率分布曲线形状不变的前提下,对不同中心折射率 n_0 (1.48~1.78)、不同折射率差值 Δn (0.008~0.12)的GRIN微球回归反射材料性能进行了大量分析计算.

图6仅将中心折射率 n_0 为1.58的部分计算结

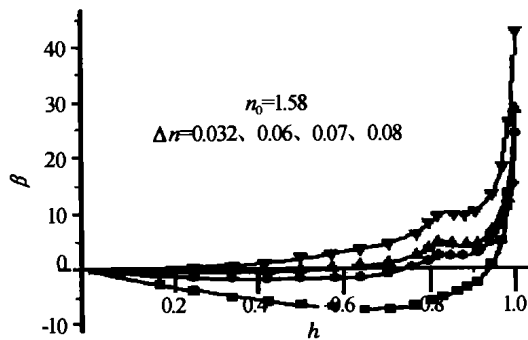


图6 GRIN微球回归反射的 h - β 关系
Fig. 6 Relationship of h - β of retro-reflection in GRIN micro-sphere

果表示了出来.($n_0 = 1.4885$ 的结果前已在图4给出.)根据计算结果分析可知:

1)在不同中心折射率 n_0 的条件下,均有其回归反射性能相对最佳的曲线.且实现相对最佳的 Δn 是随着 n_0 的提高而降低的,这与前文关于回归反射物理机理的分析是吻合的.

2)在一个相当大的范围:中心折射率取为1.5~1.6左右,并配以合适折射率差值 Δn 时,回归反射性能都较佳,均可比匀质球回归反射材料最佳性能有明显改善.

3)当中心折射率 n_0 为1.5485,折射率差值 Δn 为0.085时,回归反射性能最佳(如图5中曲线2).此时,约化高度在0~0.77范围内的入射光线,回归

反射光线的 β 角均小于 1° ;约化高度在0~0.95(占微球截面积的90%)内的入射光线, β 角均小于 2° ;入射约化高度在0~0.97(占微球截面积的94%)范围时, β 角均小于 5° .可见其更加优于均匀球回归反射材料的最佳性能.

4 结果与分析

1)用GRIN微球代替匀质玻璃微球制作回归反射平面材料是完全可能的.使用GRIN微球制作回归反射材料不仅可以大幅度降低原先对材料折射率的过高要求,还可明显提高回归反射的效率.

2)本课题组前期已使用高分子材料通过悬浮扩散共聚工艺加工批量获得GRIN聚合物微球.用这种高分子GRIN材料替代特种玻璃材料,有可能进一步降低原材料的成本.

3)目前通过悬浮扩散共聚法制备高分子GRIN微球,其折射率差值暂时还只能达0.01的水平,若要应用本课题成果制备回归反射材料就须提高GRIN的 Δn 数值,这是我们下一步探索的课题.

参考文献

- 柏庐.微玻璃球回归反光条件的理论分析.光学学报,1998,18(6):693~699
Bai L. *Acta Optical Sinica*, 1998,18(6):693~699
- 黄富泉,赵道木,王绍民,等.微珠阵列逆反射膜性能的改善.光子学报,2001,30(3):359~363
Huang F Q, Zhao D M, Wang S M, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2001,30(3):359~363
- 刘德森,高应俊.变折射率介质的物理基础.北京:国防工业出版社,1991.274~282
Liu D S, Gao Y J. *Physical foundation of inhomogeneous refractive index medium*. Beijing: National Defence Industry Press, 1991. 274~282
- 易佑民,章于川,夏茹,等.聚合物梯度折射率微球透镜的研制.光子学报,2003,32(4):425~428
Yi Y M, Zhang Y C, Xia R, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003,32(4):425~428
- 夏茹,章于川,易佑民,等.球对称梯度折射率聚合物微球的制备与折射率分布的控制.中国化学快报,2004,15(5):555~558
Xia R, Zhang Y C, Yi Y M, et al. *Chinese Chemical Letters*, 2004,15(5):555~558
- 杨群,易佑民,俞强,等.MAXWELL鱼眼微球透镜准直性能的研究.安徽大学学报,2004,28(5):32~37
Yang Q, Yi Y M, Yu Q, et al. *Journal of Anhui University Natural Science Edition*, 2004,28(5):32~37
- 易佑民,张璞扬.麦克斯韦鱼眼透镜的一种复合结构.光学技术,1995,(4):38~42
Yi Y M, Zhang P Y. *Optical Technique*, 1995,(4):38~42

The Study on Retro-reflecting Material of GRIN Micro-spherical-lens

Yi Youmin¹, Yu Qiang¹, Shi Shiwei¹, Yang Qun¹, Zhang Yuchuan², Xia Ru²

1 School of Physics and Material, Anhui University, Hefei 230039

2 School of Chemistry and Chemical Engineering, Anhui University, Hefei 230039

Received date: 2005-02-16

Abstract It is proposed a new structure of the retro-reflection plane material, in which the gradient index micro-spheres substitute for the traditional homogeneous glass spheres with high refractive index. Using the theoretical calculations of the light tracking by quadrivalence Runger-Kutta method, the technical condition of the retro-reflecting plane material of GRIN micro-sphere is obtained. The result shows that on this condition the former high demand for refractive index of medium can be highly reduced, and the function of retro-refraction of the material is improved greatly.

Keywords Retro-refraction; Gradient refractive index (GRIN); Polymer; Micro-spherical-lens; Light tracking; Quadrivalent Runge-Kutta method



Yi Youmin was born in 1944, Professor of physics in Anhui University, Vice minister of fiber optics & intergrated optics professional committee in Chinese Optics Academy. Research Field: Condensed Matter & Gradient refractive index Optics.