

DOI:10.16136/j.joel.2023.07.0462

基于径向梯度折射率透镜的消色差光学系统的设计

李春艳*, 李可, 刘继红, 吕政, 李庚鹏, 李丹琳

(西安邮电大学 电子工程学院, 陕西 西安 710121)

摘要:提出了一种基于径向梯度折射率(radial gradient index, GRIN)的消色差透镜,有效抑制了光学系统的色差效应。首先,利用径向 GRIN 透镜较低的球差和像差以及更优良的聚焦成像、更高的光学耦合效率的优势,实现了径向 GRIN 透镜的消色差光学系统的设计,消除了高阶像差。其次,通过对 ZEMAX 操作数 POWR 和 SPHA 的控制,分别对光学系统的光焦度和球差进行了优化设计。最后,推导并建立了径向 GRIN 透镜消色差光学系统的光焦度和色散模型,进行了径向 GRIN 透镜与常规胶合透镜的消色差效果对比实验。实验结果表明,径向 GRIN 透镜可以在波长范围 486—656 nm 良好的消色差功能,且消色差效果明显优于常规胶合透镜。径向 GRIN 透镜的弥散斑在艾里斑内,镜头聚焦情况良好,像差基本矫正且达到衍射极限,符合消色差透镜的良好成像要求。

关键词:径向梯度折射率(GRIN)透镜;消色差透镜;光学设计;光学材料;色散

中图分类号:TH741 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-0086(2023)07-0682-08

Design of achromatic optical system based on radial gradient index lens

LI Chunyan*, LI Ke, LIU Jihong, LV Zheng, LI Gengpeng, LI Danlin

(School of Electronic Engineering, Xi'an University of Posts & Telecommunications, Xi'an, Shaanxi 710121, China)

Abstract: An achromatic lens based on radial gradient index (GRIN) is proposed, which effectively suppresses the chromatic aberration effect of optical systems. Firstly, the radial GRIN lens has the advantages of the lower spherical aberration, better-focusing imaging, and higher optical coupling efficiency. Considering the above advantages, an achromatic optical system of the radial GRIN lens is designed to eliminate the high-order aberration. Moreover, the optical power and spherical aberration of the optical system are optimized by controlling the operands POWR and SPHA in ZEMAX software. Finally, the optical power and dispersion model of the achromatic optical system based on radical GRIN lens is derived and established. At the same time, the achromatic effect comparative experiments for the radial GRIN lens and homogeneous doublet lens are conducted. The experimental results show that the radial GRIN lens can achieve good achromatic function in the wavelength range of 486—656 nm. The achromatic effect is significantly better than the homogeneous doublet lens. The blur spots of the radial GRIN lens are all within the Airy spots, and the lens is well focused. The aberration is basically corrected and the diffraction limit is reached, which meets the imaging requirements of the achromatic lens well.

Key words: radial gradient index (GRIN) lens; achromatic lens; optical design; optical materials; dispersion

* E-mail: yanerley@163.com

收稿日期:2022-06-22 修订日期:2022-09-12

基金项目:国家自然科学基金(61805199)、陕西省自然科学基金(2022JM-387)、陕西省重点研发计划(2020GY-127)、陕西省教育厅专项科研计划(20JK0908)和西安市科技计划项目(2020KJRC0112)资助项目

0 引言

在成像或检测系统中,消除色差一直以来是研究的重要课题之一,消色差透镜在望远系统、显微系统以及光学成像系统等领域有着重要应用^[1-3]。目前大多数的消色差透镜体积较大且消色差效果欠佳而无法适应当前光电系统集成化、微型化以及新型精密成像系统的发展需求。梯度折射率(gradient index, GRIN)透镜作为当前新型的光学元件,是一种折射率呈梯度非均匀变化的圆柱型透镜。与均匀介质透镜相比,GRIN透镜具有更好的光学特性(更好的聚焦成像、更小的有效焦距、更高的光学耦合效率等特点)^[4,5];此外,GRIN透镜还具有简单的几何形状以及较小的尺寸,能够与其他光学元件进行有效组合,在光学系统中易于操作与安装,因而在内窥镜系统、光电传感器、光通信传输系统以及光学透镜中发挥了重要作用^[6,7]。光学物镜的色散将导致透镜在入射光照射下焦点发生分离,不同波长的光被分散到光轴的不同位置,极大影响了透镜的成像性能,造成成像模糊等一系列光学误差^[8-10]。针对上述问题,WU等^[11]提出了宽带消色差超构透镜,优化了宽带消色差的设计思路,通过超构透镜表面的几何相位和共振相位实现了对光学器件中波长基础相位和色差相位的有效拆分,设计出了近红外波段消色差反射透镜,并利用可见光下的 GaN 纳米柱和槽结构,设计了消色差透镜;XIAO等^[12]提出了离散波长消色差超构透镜,阐述了离散波长消色差的效率变化规律,证明了双波长消色差超构透镜效率大概为宽带消色差超构透镜的4倍,并对其进行了模拟仿真验证;GONG等^[13]提出了消色差衍射透镜,采用了标量衍射理论对等宽和等面积两种不同方式进行了仿真分析,设计的消色差衍射透镜的标准偏差由0.6607下降到0.1519,同时保证良好的成像效果;BUCZYNSKI等^[14]提出了纳米结构消色差 GRIN 微透镜方法实现透镜成像的消色差,将纳米技术与光纤拉伸技术应用于消色差 GRIN 透镜的研制,采用了波长 532 nm、658 nm、850 nm、980 nm、1 310 nm、1 550 nm 的连续波激光源发出的准直光作为光源,实现了 GRIN 透镜消色差。

虽然上述方法较好地实现了消色差效果,但是消色差超构透镜的尺寸、数值孔径和带宽存在着内部制约关系,消色差效率较低;消色差衍射透镜在宽波段工作时仍存在色散严重、像质不佳等问题。本文基于以上现状提出使用 GRIN 透镜来实现消色差的设计。目前,现有的工艺可以通过

一系列分层元件,生产出包含数十到数千层的薄膜,每层厚度从微米到纳米级不等,通过优化模层设计、选择匹配的聚合物体系和整合表面能力,可以使聚合物透镜膜层的均匀性得到很大的改善,对制备混合物 GRIN 透镜提供了可行性^[15]。本文从径向一阶 GRIN 透镜的光焦度表达式出发,推导了透镜的色散公式,得到一组设计 GRIN 透镜的消色差表达式;通过推导出材料之间的关系,表明所选材料的适宜性,建立了径向 GRIN 透镜消色差光学系统的模型;通过 MATLAB 和 ZEMAX 仿真软件完成了对 GRIN 透镜消色差的仿真设计。本文的研究结果对于将新型材料 GRIN 透镜应用于消色差理论中具有一定的促进意义,同时对 GRIN 透镜消色差材料选择以及 GRIN 透镜在光学系统中实现消色差具有一定的指导意义。

1 径向 GRIN 透镜及其光学特性

1.1 一阶径向 GRIN 透镜

GRIN 光学透镜主要通过其非均匀分布的折射率实现光学功能。GRIN 透镜具有形状简单、尺寸小、质量轻、光路短等特点,可以在一定程度上减小光学系统的架构;同时 GRIN 透镜又有便于集成、易于批量生产、性能良好等优点^[16]。根据折射率梯度方向变化的不同,GRIN 元件可以分为:轴向 GRIN 元件、径向 GRIN 元件、层状 GRIN 元件和球 GRIN 元件^[17]。

GRIN 透镜的折射率分布函数为:

$$n(r, z, \lambda) = \sum_{a=0}^A \sum_{b=0}^B \gamma_{ab}(\lambda) r^{2b} z^a, \quad (1)$$

式中, $\gamma_{ab}(\lambda) = \sum_{c=0}^C V_{abc} (\lambda - \lambda_0)^c$, $\gamma_{ab}(\lambda)$ 表示折射率阶数, λ_0 是可见光波长, V_{abc} 表示材料的色散系数; r 是距光轴的径向距离; z 是沿光轴到原点的距离。

本文研究的径向 GRIN 透镜具有圆对称分布,由于径向 GRIN 透镜内部的折射率分布沿径向梯度变化,有聚焦成像的特点,因此又称为自聚焦透镜。径向 GRIN 透镜示意图如图 1 所示。

为了得到一阶径向 GRIN 透镜的折射率表达式,对式(1)中 z 求导:

$$\frac{dn(r, z, \lambda)}{dz} = \sum_{a=0}^A \sum_{b=0}^B a \gamma_{ab}(\lambda) r^{2b} z^{a-1}. \quad (2)$$

为了便于分析,本文考虑一阶径向梯度, $A = 1, B = 1$ 时表示为一阶径向梯度,将其代入式(2):

$$\frac{dn(r, z, \lambda)}{dz} = \sum_{a=0}^1 \sum_{b=0}^1 a \gamma_{ab}(\lambda) r^{2b} z^{a-1}. \quad (3)$$

求导计算得:

$$\sum_{a=0}^1 \sum_{b=0}^1 a\gamma_{ab}(\lambda)r^{2b}z^{a-1} = \sum_{a=0}^1 [a \cdot \gamma_{a \times 0}(\lambda)z^{a-1} \cdot 1 + a \cdot \gamma_{a \times 1}(\lambda)z^{a-1}r^2] = \gamma_0(\lambda) + \gamma_{1 \times 1}(\lambda) \cdot r^2 \quad (4)$$

一阶径向 GRIN 透镜折射率分布为：
 $n(r, \lambda) = n_0(\lambda) + \gamma(\lambda)r^2 \quad (5)$

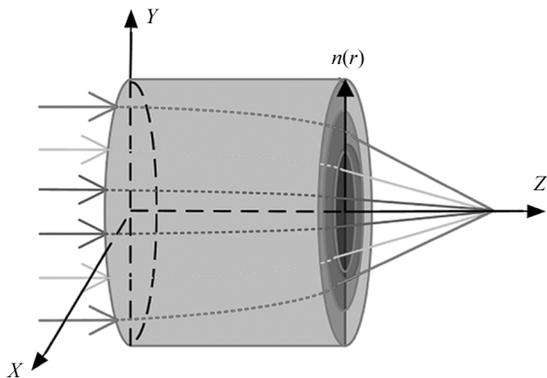


图 1 径向梯度折射率示意图
 Fig. 1 Schematic diagram of radial GRIN

1.2 径向 GRIN 平凸透镜的光学特性

为使用径向 GRIN 透镜来实现光学系统消色差效果的设计,本文以平凸透镜结构为例说明设计过程和结果分析;基于径向 GRIN 的平凸透镜结构图如图 2 所示。

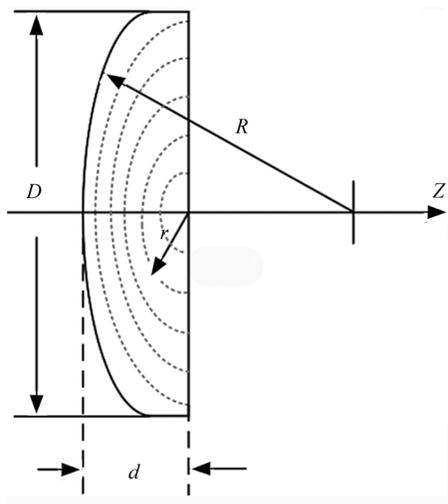


图 2 径向 GRIN 平凸透镜结构图
 Fig. 2 Structure diagram of plane-convex radial GRIN lens

从图 2 可以看出,GRIN 透镜的半径为 r,曲率半径为 R,透镜中心厚度为 d,直径为 D,焦距为 f。此处为了更加清晰地了解 GRIN 的梯度特征,采用虚线进行区分,以便更加直观地了解径向 GRIN

平凸 GRIN 透镜。由式(5)可知,GRIN 透镜的中心折射率分布 $n_{center}(\lambda)$ 和边缘折射率分布 $n_{edge}(\lambda)$ 分别可以表示为:

$$n_{center}(\lambda) = n(0, \lambda) = n_0(\lambda) \quad (6)$$

$$n_{edge}(\lambda) = n(D/2, \lambda) = n_c(\lambda) + \gamma(\lambda)(D/2)^2 \quad (7)$$

化简得:

$$\gamma(\lambda) = (2/D)^2 [n_{edge}(\lambda) - n_{center}(\lambda)] \quad (8)$$

式中, $\gamma(\lambda_0) < 0$,透镜中心折射率大于透镜边缘折射率,具有正光焦度。光焦度的函数表达式为:

$$\phi(\lambda) = \frac{1}{f(\lambda)} \quad (9)$$

结合 P. J Sands 在近轴光学中的理论以及式(9)可以得到:

$$\phi(\lambda) = \phi_R(\lambda)C[\Phi(\lambda)] + \phi_G(\lambda) \frac{S[\Phi(\lambda)]}{\Phi(\lambda)} \quad (10)$$

式中, C 为高斯系数, $\phi_R(\lambda)$ 表示常规双胶合透镜的光焦度, $\phi_G(\lambda)$ 表示径向 GRIN 透镜的光焦度, $\Phi(\lambda)$ 为梯度特征, S 为符号函数。

$$\phi_R(\lambda) = \left[\frac{1}{R_f} - \frac{1}{R_b} \right] [n_{center}(\lambda) - 1] \quad (11)$$

$$\phi_G(\lambda) = S \frac{\Phi^2(\lambda)n_{center}(\lambda)}{d} \quad (12)$$

$$\Phi(\lambda) = \sqrt{\left(\frac{8d^2}{D^2} \right) \left[\frac{|n_{edge}(\lambda) - n_{center}(\lambda)|}{n_{center}(\lambda)} \right]} \quad (13)$$

式中, R_f 为常规双胶合透镜的前表面半径, R_b 为常规双胶合透镜的后表面半径。为实现消色差,使 $d\Phi(\lambda_0)/d\lambda = 0$,即在设计波长 λ_0 附近的光焦度不随波长 λ 的变化而变化,得:

$$\phi(\lambda) = \phi_R(\lambda) \cos\Phi(\lambda) + \phi_G(\lambda) \frac{\sin[\Phi(\lambda)]}{\Phi(\lambda)} \quad (14)$$

对其关于波长进行求导:

$$\begin{aligned} \frac{d\phi(\lambda)}{d\lambda} = & \left(\cos\Phi(\lambda) \frac{d\phi_R(\lambda)}{d\lambda} - \phi_R(\lambda) \frac{\sin[\Phi(\lambda)]}{\Phi(\lambda)} \times \Phi(\lambda) \frac{d\Phi(\lambda)}{d\lambda} \right) + \\ & \frac{d[\Phi^2(\lambda)n_{center}(\lambda)/d]}{d\lambda} \times \frac{\sin[\Phi(\lambda)]}{\Phi(\lambda)} + \\ & \Phi^2(\lambda) \frac{n_{center}(\lambda)}{d} \times \frac{d[\sin[\Phi(\lambda)]/\Phi(\lambda)]}{d\lambda} \quad (15) \end{aligned}$$

式中, $\Phi(\lambda)$ 表示径向 GRIN 平凸 GRIN 透镜的梯度特征,即 GRIN 在透镜中的变化梯度,对透镜材料中的梯度结构进行了进一步的解释。

根据径向 GRIN 透镜色差理论,定义 $\Psi_1(\lambda)$ 为:

$$\Psi_1(\lambda) = \frac{1}{n_{\text{center}}(\lambda)} \times \frac{dn_{\text{center}}(\lambda)}{d\lambda} - \frac{1}{n_{\text{edge}}(\lambda)} \times \frac{dn_{\text{edge}}(\lambda)}{d\lambda} \quad (16)$$

根据求导以及上述色差理论,可以推导出:

$$\frac{1}{V_R(\lambda)} = \frac{C[\Phi(\lambda)]}{n_{\text{center}}(\lambda) - 1} \times \frac{dn_{\text{center}}(\lambda)}{d\lambda} + S_G \frac{S[\Phi(\lambda)]}{\Phi(\lambda)} \times \frac{[\Phi^2(\lambda)]}{2} \times \Psi_1(\lambda) \frac{n_{\text{edge}}(\lambda)}{n_{\text{edge}}(\lambda) - n_{\text{center}}(\lambda)}, \quad (17)$$

$$\frac{1}{V_G(\lambda)} = \frac{1}{2[n_{\text{edge}}(\lambda) - n_{\text{center}}(\lambda)]} \times \left\{ \frac{dn_{\text{center}}(\lambda)}{d\lambda} \times \left[2 \frac{S[\Phi(\lambda)]}{\Phi(\lambda)} - \frac{n_{\text{edge}}(\lambda)}{n_{\text{center}}(\lambda)} \times \left(\frac{S[\Phi(\lambda)]}{\Phi(\lambda)} - C[\Phi(\lambda)] \right) \right] - \frac{dn_{\text{edge}}(\lambda)}{d\lambda} \times \left(\frac{S[\Phi(\lambda)]}{\Phi(\lambda)} + C[\Phi(\lambda)] \right) \right\}, \quad (18)$$

式中, V 和材料的色散有关,类似于阿贝数。 V 值越大,色散越小; V 值越小,色散越大。通过光焦度公式和色散公式,即使用式(12)和式(18)对径向 GRIN 透镜相关参数进行设计。通过本节光焦度和色散模型的推导,确定消色差材料,从而实现一阶径向 GRIN 透镜消色差光学系统的设计。

2 基于 GRIN 透镜的消色差光学系统的设计

通过在第一节推导一阶径向 GRIN 透镜的光焦度与色散公式,本节将结合一阶径向 GRIN 透镜的光焦度与色散公式对 GRIN 透镜消色差光学系统进行设计。在上述的定义中,保证色散平衡的同时要最大限度地提高镜头的光焦度,这样在实现透镜生产的过程中会更加简易。GRIN 透镜消色差设计取决于波长附近光焦度的比值,而这个比值与材料的色散系数具有以下关系:

$$\frac{\phi_G(\lambda)}{\phi_R(\lambda)} = -\frac{V_G(\lambda)}{V_R(\lambda)}, \quad (19)$$

式中, $\phi_G(\lambda)$ 和 $V_G(\lambda)$ 表示的是径向 GRIN 透镜的光焦度和色散, $\phi_R(\lambda)$ 和 $V_R(\lambda)$ 表示的是常规双胶合透镜的光焦度和色散。因此在设计 GRIN 消色差透镜的过程中,尽可能地保持较小的负色散,即应尽量使其比值较小:

$$\left| V_G(\lambda_0) \right| = \left| \frac{dn_{\text{center}}(\lambda_0)/d\lambda}{n_{\text{center}}(\lambda_0) - 1} \times \frac{n_{\text{center}}(\lambda_0) - n_{\text{edge}}(\lambda_0)}{dn_{\text{edge}}(\lambda_0)/d\lambda - dn_{\text{center}}(\lambda_0)/d\lambda} \right|. \quad (20)$$

本文以设计一个可见光准直光束聚焦系统为例,具体要求为:口径 D 为 18 mm,焦距 f 为 54 mm。为实现对比分析,首先通过 SCHOTT 玻璃库进行材料选择,通过式(19)和式(20)进行色散以及光焦度的计算,最终选择常规 N-PSK57 和 N-KZFS11 消色差玻璃对,实现的双胶合消色差系统设计参数如表 1 所示。

表 1 常规双胶合透镜的消色差参数

| Tab. 1 Achromatic parameters of homogeneous doublet lens | | | | | |
|--|------------------|-------------|-------------------------|---------|---------------|
| Class | Refractive Index | Abbe number | Radius of curvature /mm | Air /mm | Thickness /mm |
| N-PSK57 | 1.589 | 59.36 | 31.857 | 82.633 | 4 |
| N-KZFS11 | 1.613 | 42.4 | -20.369 | 82.633 | 1 |

通过上述表 1 常规双胶合透镜的消色差参数,在光学仿真软件中进行光学设计,设计完成后通过 ZEMAX 操作数对系统进行优化设计。分别使用 ZEMAX 操作数 POWR 和 SPHA 对光学系统的光焦度和球差进行了优化设计。

分析常规消色差玻璃对实现的双胶合透镜系统,利用 Go-Foton 公司的 GRIN 材料折射率分布常数,结合式(5)、式(6)得到消色差 GRIN 透镜的折射率分布为:

$$n(r, \lambda) = n_0(\lambda) + \left[-\frac{1}{2}n_0(\lambda) \times \left(0.1468 + \frac{2.654 \times 10^{-3}}{\lambda^2} + \frac{3.960 \times 10^{-6}}{\lambda^4} \right)^2 \right] \times r^2. \quad (21)$$

结合 $n_c(\lambda) = n_0(\lambda) = 1.6107 + 9.8 \times 10^{-3}\lambda^{-2}$ 和式(21)以及 $n_e(\lambda) = n\left(\frac{D}{2}, \lambda\right)$ 确定消色差平凸 GRIN 透镜的结构参数。对于 GRIN 消色差透镜的选材一般是高折射率、低色散和低折射率、高色散的材料。通过以上建立的 GRIN 消色差透镜模型,即可在 SCHOTT 玻璃库中寻找合适的 GRIN 透镜消色差玻璃材料;寻找材料时,尽可能在符合消色差设计的条件下,找到折射率相近且具有不同色散的中心和边缘材料。两种材料的体积分数之和为 1,其中 V_1 和 V_2 分别为不同的玻璃材料,即:

$$\gamma_{V_1}(x) + \gamma_{V_2}(x) = 1, \quad (22)$$

$$\gamma_{V_1}(x) = \frac{n^2(x) - n_{V_2}^2(\lambda_0)}{n_{V_1}^2(\lambda_0) - n_{V_2}^2(\lambda_0)}, \quad (23)$$

$$\gamma_{V_2}(x) = \frac{n^2(x) - n_{V_1}^2(\lambda_0)}{n_{V_2}^2(\lambda_0) - n_{V_1}^2(\lambda_0)}. \quad (24)$$

式(23)和式(24)分别表示的是两种不同材料在混合物玻璃材料中的体积分数,通过计算体积分数,为制作混合物 GRIN 透镜提供了一定的技术支持,目前国外通过不同的体积占比制作 GRIN 透镜技术已相对成熟,具体材料制备方法可参考文献[15]。

表2为平凸GRIN消色差透镜材料结构参数,

表3为根据光焦度和色散模型建立的折射率与阿贝数的对应关系。

表2 平凸 GRIN 消色差材料参数

Tab.2 Parameters of plane-convex GRIN achromatic materials

| Radius of curvature/mm | Air/mm | Thickness/mm |
|------------------------|----------|--------------|
| 9 | ∞ | 2.08 |

表3 平凸径向 GRIN 透镜折射率与阿贝数的部分对应关系

Tab.3 Corresponding relationship between refractive index and Abbe number of a plane-convex GRIN lens

| Refractive index | 1.652 | 1.651 | 1.649 | 1.646 | 1.642 | 1.637 | 1.631 | 1.624 | 1.616 | 1.607 | 1.597 | 1.586 | 1.575 |
|------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Abbe number | 34.168 | 34.256 | 34.434 | 34.707 | 35.083 | 35.571 | 36.187 | 36.951 | 37.889 | 39.037 | 40.447 | 42.188 | 44.364 |

3 实验仿真与分析

由于消色差平凸 GRIN 材料的限制,设计实现的基于径向消色差平凸 GRIN 材料的消色差透镜口径较小,为便于说明问题,本文选择在近轴范围内对常规透镜以及设计的平凸径向 GRIN 透镜的消色差效果进行对比分析。

通过在 MATLAB 中进行折射率与半径的仿真,图3中波长 $\lambda_1 = 486 \text{ nm}$, 波长 $\lambda_2 = 587 \text{ nm}$, 波长 $\lambda_3 = 656 \text{ nm}$,得到的图3为在恒定波长下 GRIN 半径与折射率的变化关系,从图3中可以看出,波长分别为 $\lambda_1 = 486 \text{ nm}$, $\lambda_2 = 587 \text{ nm}$, $\lambda_3 = 656 \text{ nm}$ 下的折射率随 GRIN 半径的增大而减小,在轴心处折射率最大,满足设计要求。

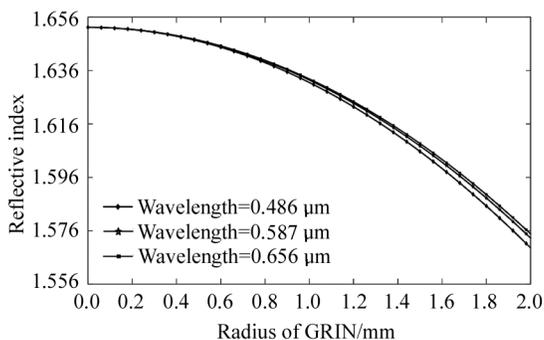


图3 恒定波长下 GRIN 半径与折射率关系

Fig.3 Relationship between GRIN radius and refractive index with constant wavelength

图4直观地表示了 GRIN 透镜的折射率随不同波长以及曲率半径的变化关系;根据式(1)以及 Go-Foton 公司的 GRIN 材料折射率分布常数能够更清晰地反映出光学系统波长、GRIN 半径与折射率之间

的内在关系。由图4可以看出:在光轴原点处的折射率最大,折射率呈抛物线分布,同时也可以看出不同波长折射率的变化分布。

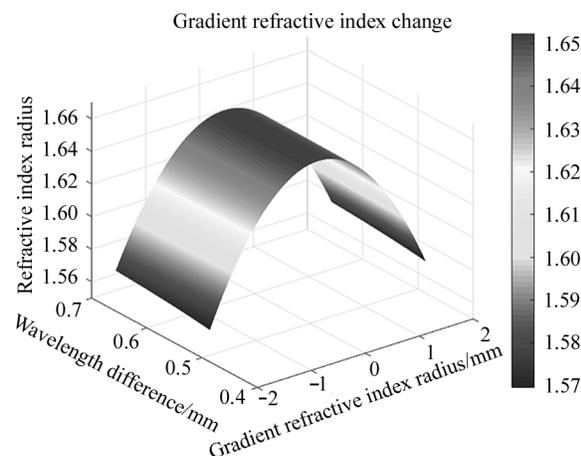


图4 径向 GRIN 透镜折射率分布示意图

Fig.4 Schematic diagram of refractive index distribution of radial GRIN lens

通过图4可以清晰直观地观察到,在波长恒定的情况下,折射率随 GRIN 透镜的半径增大而减小,并且在轴心中心处的折射率达到最大值,与图3恒定波长下 GRIN 半径与折射率的关系图吻合。图4通过三维图形更加直观地展示了波长、折射率以及 GRIN 透镜的 GRIN 半径之间的关系。

图5根据式(21)在 ZEMAX 仿真软件中对透镜进行模拟,设计出透镜内部 GRIN 的变化以及折射率范围,可以得到平凸径向 GRIN 透镜折射率随 GRIN 半径的变化而变化的直观图,不同颜色代表折射率变化的不同。

图5直观地表示了径向 GRIN 透镜的折射率分

布特点以及对应的大小关系。利用 ZEMAX 仿真软件分别完成对常规双胶合透镜和平凸径向 GRIN 透镜的设计,波长为 F、d、C 可见光的波长,常规双胶合透镜 2D 结构图如图 6(a)所示,径向 GRIN 透镜 2D 结构图如图 6(b)所示,为了便于查看透镜形状,径向 GRIN 透镜结构按比例放大如下:

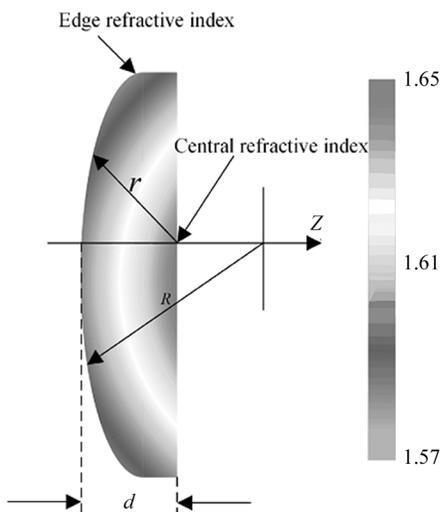


图 5 平凸径向 GRIN 透镜示意图

Fig. 5 Schematic diagram of plane-convex radial GRIN lens

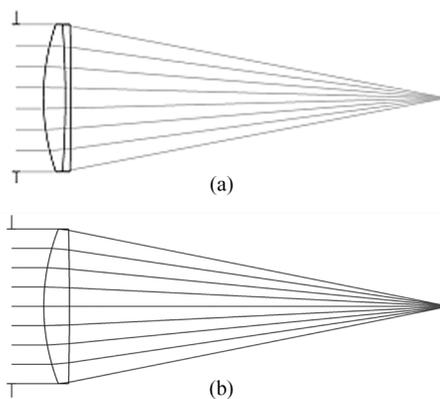


图 6 两种消色差透镜 2D 视图:(a) 常规双胶合透镜结构;
(b) 径向 GRIN 透镜结构

Fig. 6 Two achromatic lenses for 2D views:
(a) Homogeneous doublet lens structure;
(b) Radial GRIN lens structure

消色差常规透镜和消色差平凸径向 GRIN 透镜在波长 486 nm、587 nm、656 nm 处的点列图分别如图 7 和图 8 所示。

通过 POWR 操作数控制光学系统的光焦度, SPHA 操作数控制系统的球差,在 ZEMAX 中对以上两种结构进行结构优化以保证消色差效果。波长

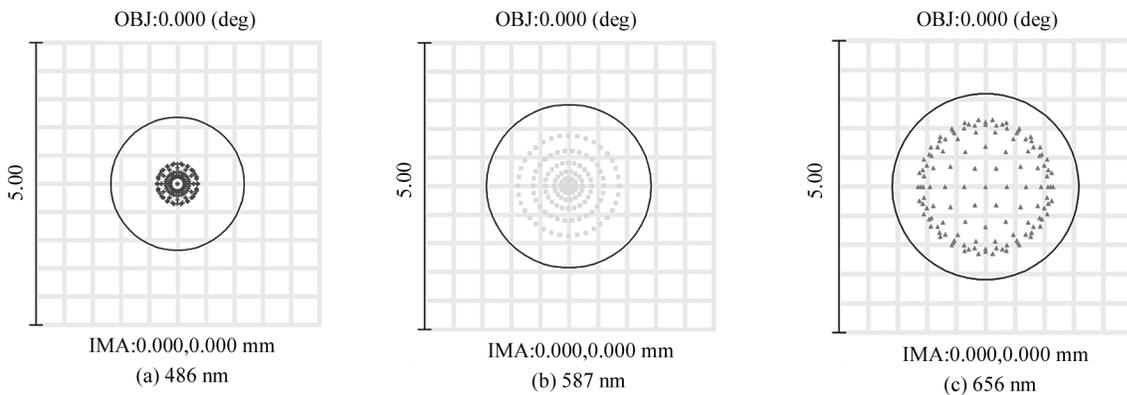


图 7 常规透镜各波长对应点列图

Fig. 7 Spot diagram corresponding to each wavelength of homogeneous lens

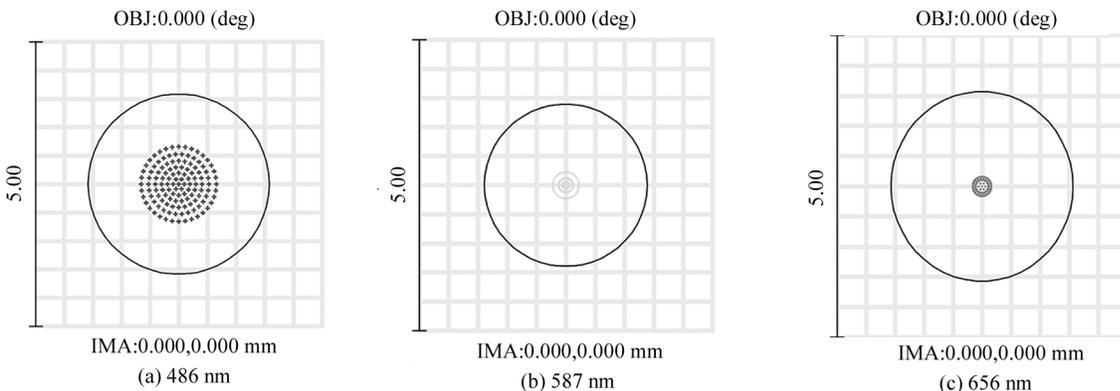


图 8 径向 GRIN 透镜各波长对应点列图

Fig. 8 Spot diagram corresponding to each wavelength of radial GRIN lens

486 nm、587 nm、656 nm 在聚焦位置的均方根 (root mean square, RMS) 半径均小于艾里斑半径, 三种单色可见光达到衍射极限且聚焦良好, 满足径向 GRIN 透镜的消色差设计要求。

ZEMAX 中的光线像差图 (光扇图) 可以直观地定量分析色差在不同孔径的大小, 即在不同光瞳处主光线与像上高度的高度差。通常使用波长光束的两个剖面来进行分析: 光瞳 Y 轴的剖面称为子午光扇面, 光瞳 X 轴的剖面称为弧矢光扇面; 子午面在纵坐标上对应的区间表示子午光束在像平面上的最大弥散范围, 弧矢面反映的是弧矢光束在像平面上的最大弥散范围, 将点列图与光线像差图结合起来表示本文设计的光学系统的消色差质量。图 9(a) 表示的是常规透镜的消色差效果, 透镜没有完全消除高阶色差; 图 9(b) 表示的是平凸径向 GRIN 透镜消色差效果, 可以看出径向 GRIN 透镜已经消除了高阶色差, 且平凸径向 GRIN 透镜消色差效果良好, 优于常规双胶合消色差透镜, 满足消色差透镜良好的成像要求。

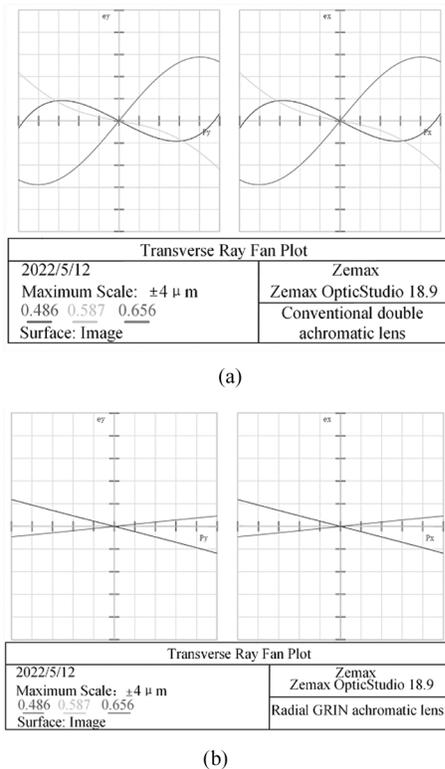


图 9 两种消色差透镜的光线像差图:
(a) 常规双胶合透镜的光线像差图;
(b) 径向 GRIN 透镜的光线像差图

Fig. 9 Ray aberrations diagram of two achromatic lenses:
(a) Ray aberration diagram of homogeneous doublet lens;
(b) Ray aberration diagram of radial GRIN lens

4 结 论

本文基于 GRIN 透镜聚焦效果好、体积小、耦合效率高等光学特性, 提出采用径向 GRIN 透镜设计消色差光学系统, 研究了一阶径向 GRIN 透镜光焦度以及色差理论, 根据折射率与 GRIN 半径以及波长之间的关系完成并建立了一阶径向 GRIN 透镜光焦度以及色差模型; 通过 MATLAB 软件对折射率在波长恒定下随 GRIN 半径变化关系进行仿真设计; 最后在 ZEMAX 中完成了对径向 GRIN 透镜以及常规双胶合消色差光学系统的设计。与常规双胶合透镜进行消色差效果比较, 径向 GRIN 透镜的消色差效果优于常规双胶合透镜消色差效果, 几乎消除了高阶色差, 成像效果良好。在波长范围 486—656 nm 区间, GRIN 透镜实现了消色差效果且聚焦效果良好, 各波长处光斑的 RMS 半径均小于艾里斑半径, 达到衍射极限; 从光线像差图可以看出径向 GRIN 透镜已经消除了高阶球差, 符合本文设计的一阶径向 GRIN 消色差透镜的要求, 后续可探索并研究更多玻璃材料应用在消色差光学系统设计中。本文的研究对平凸径向 GRIN 透镜消色差理论研究以及消色差材料的选择具有一定的指导价值, 同时对 GRIN 透镜在消色差中的应用及其光学设计提供了相关参考。

参考文献:

[1] XIAO C H, ZHANG N. Assessments of the feasibility of phase measurement using coherent light illuminated schlieren apparatus[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2021, 32(9): 935-944.
肖春晖, 张楠. 使用相干光照明的纹影成像装置进行相位测量的可行性研究[J]. 光电子·激光, 2021, 32(9): 935-944.

[2] LIU F, WEI Y Z, HAN P L, et al. Design of monocentric wide field-of-view and high-resolution computational imaging system [J]. Acta Physica Sinica, 2019, 68(8): 084201.

[3] XIE H B, MAO C S, MA J, et al. Design of a miniaturized dual-lens system for Gaussian beam shaping in far field [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2018, 29(5): 523-529.
谢洪波, 毛晨盛, 马骏, 等. 一种用于高斯光束远场整形的小型双透镜系统设计[J]. 光电子·激光, 2018, 29(5): 523-529.

[4] CHEN Y F, LIN J Y, YE P T, et al. Dual GRIN lens two-

- photon endoscopy for high-speed volumetric and deep brain imaging[J]. *Optics Express*, 2020, 12(1): 162-172.
- [5] NICHOLAS S, GREG R, DUNCAN T. Freeform gradient index progressive addition lens raytrace performance evaluation[J]. *Applied Optics*, 2022, 61: 28-36.
- [6] LEPICARD A, BONDU F, KANG M, et al. Long-lived monolithic micro-optics for multispectral GRIN applications[J]. *Nature*, 2018, 8(1): 7388.
- [7] FAUSTA L, FULVIA V, ANNA D, et al. Dual-step method to manufacture a polymeric GRIN lens with a high refractive index range [J]. *Applied Optics*, 2021, 60(36): 11228-11234.
- [8] LIU F, WU X Q, ZHAO L, et al. Research progress of wide-field and high-resolution computational optical imaging system[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(18): 1811001.
- 刘飞, 吴晓琴, 赵琳, 等. 广域高分辨率计算光学成像系统研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(18): 1811001.
- [9] TIAN X, HUANG B Y, ZHANG J. Study on high efficiency coupling of free space laser entering single mode fiber using single lens[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2020, 31(4): 362-366.
- 田晓, 黄宝玉, 张俊. 利用单透镜结构实现自由空间激光进入单模光纤的耦合研究[J]. *光电子 • 激光*, 2020, 31(4): 362-366.
- [10] SUN Y J, LIU H, LI J H, et al. Smoothing the edge of DMD scanning pattern by free surface lens[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(4): 411002.
- 孙彦杰, 刘华, 李金环, 等. 自由曲面光学透镜平滑 DMD 扫描光刻图形边缘 [J]. *光子学报*, 2019, 48(4): 411002.
- [11] WU Y F, WANG S M. Research on broadband achromatic metalenses[J]. *Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica)*, 2022, 52(6): 142-147.
- 吴一凡, 王漱明. 宽带消色差超构透镜研究[J]. *中国科学: 物理学力学天文学*, 2022, 52(6): 142-147.
- [12] XIAO X J, ZHU S N, LI T. Performance analysis of the multiwavelength achromatic metalens[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(4): 823-830.
- 肖行健, 祝世宁, 李涛. 离散波长消色差超构透镜的性能分析[J]. *中国光学*, 2021, 14(4): 823-830.
- [13] GONG C C, LIU X, FAN B, et al. Design and analysis of diffractive achromats based on RGB three-band[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(11): 1105001.
- 巩畅畅, 刘鑫, 范斌, 等. 基于 RGB 三波段的消色差衍射透镜设计与分析 [J]. *光学学报*, 2021, 41(11): 1105001.
- [14] BUCZYNSKI R, FILIPKOWSKI A, PIECHAL B, et al. Achromatic nanostructured gradient index microlenses[J]. *Optics Express*, 2019, 27(7): 9588-9600.
- [15] LAVANANT E, CALVEZ L, CHEVIRE F, et al. Radial gradient refractive index (GRIN) infrared lens based on spatially resolved crystallization of chalcogenide glass [J]. *Optics Materials Express*, 2020, 10(4): 860-867.
- [16] DAVID H, NICHOLAS S, YANG T Y, et al. Freeform gradient-index media: a new frontier in freeform optics[J]. *Optics Express*, 2021, 29(2): 36997-37012.
- [17] WANG D F, REN Z Y, ZHUANG G Z. A review of gradient index metamaterials lenses[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2022, 67(12): 1279-1289.
- 王丹凤, 任致远, 庄国志. 梯度折射率超材料透镜[J]. *科学通报*, 2022, 67(12): 1279-1289.

作者简介:

李春艳 (1987—), 女, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为光电测量传感技术。