

Research of Gradient Refractive Index Lens

Meiling Zhang, Hua Zou

School of Science, Hohai University, Nanjing Jiangsu

Email: zouhua96@163.com

Received: Jun. 10th, 2016; accepted: Jun. 27th, 2016; published: Jun. 30th, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Gradient refractive index lens (GRIN) is a non-uniform refractive index lens, which has the characteristics of small volume, easy processing and high coupling efficiency. In order to better understand and apply GRIN lens, a detailed investigation and analysis of different types and principle of GRIN lens, and four primary producing methods of GRIN are introduced in this paper. Application of GRIN in medical, communications, industrial field and LAMOST (The Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopic Telescope) is summarized. Through the comparison of all aspects of the properties and applications, we observe that different types and properties of the GRIN lens have a wide range of applications in different areas.

Keywords

Gradient Refractive Index Lens, Types, Producing Methods, Application

梯度折射率透镜的研究

张美玲, 邹 华

河海大学理学院, 江苏 南京

Email: zouhua96@163.com

收稿日期: 2016年6月10日; 录用日期: 2016年6月27日; 发布日期: 2016年6月30日

摘 要

梯度折射率(GRIN)透镜是非均匀折射率透镜, 具有体积小、易加工、耦合效率高等特点。为了更好的了

文章引用: 张美玲, 邹华. 梯度折射率透镜的研究[J]. 光电子, 2016, 6(2): 101-111.

<http://dx.doi.org/10.12677/oe.2016.62015>

解和应用GRIN透镜, 本文对GRIN透镜做了详细的调研和分析研究, 研究了不同类型的GRIN透镜及其原理, 介绍了GRIN透镜四种常用的制备方法, 并总结了GRIN透镜在医学、通信、工业领域及LAMOST (大天区面积多目标光纤光谱仪天文望远镜)中的应用, 通过比较各方面的特性和应用, 可知不同类型、不同特性的GRIN透镜在不同领域有着广泛的应用。

关键词

梯度折射率透镜, 分类, 制备方法, 应用

1. 引言

梯度折射率透镜, 是由具有梯度折射率的物质设计或是制造出来的光学透镜, 折射率不是常数, 又称变折射率透镜、非均匀透镜或者渐变折射率透镜[1]。从 1854 年提出到 1951 生产, 再到上世纪 80 年代后的广泛应用, GRIN 得到快速发展。主要出现的种类分为: 轴向梯度折射率透镜、径向梯度折射率透镜、球面梯度折射率透镜三大类型[2]。

研究梯度折射率透镜的发展也就是梯度折射率光学的发展。GRIN 光学现象是自然界普遍存在的一种物理现象, 如生活中的海市蜃楼现象, 太阳日出日落时的形状变化, 都与非均匀介质的折射率有很大关系, 再如眼睛的晶状体结构也与此有关[3]。非均匀介质拥有均匀介质所不具有的光学性能, 引起广泛的关注和研究应用[4], GRIN 光学由于它体积小、易加工、耦合效率高特点已广泛应用于光纤通信、微型光学领域和医学领域等, 并且 GRIN 在低压下准直光束, 在高压下会聚光束[5], 所以对 GRIN 的研究具有广泛实际意义。

本文从 GRIN 透镜的类型、制备方法、应用等角度来分析 GRIN 的特性, 对制备方法进行比较, 对 GRIN 透镜在各方面的应用进行了详细的说明, 这对 GRIN 以后的研究和应用有很大的指导意义。

2. 梯度折射率光学的发展史

梯度折射率光学近年来得到发展的原因很多[6], 早在 1854 年, 英国著名物理学家麦克斯韦(Maxwell)就提出了 Maxwell 鱼眼透镜的理论模型, 被称为“绝对光学仪器”[3]。这种模型具有重大的意义, 但是无法制作出来。1900 年 Wood(伍德)提出了属于径向梯度折射率型的 Wood 透镜, 它是用明胶制成的折射率成轴对称分布的圆柱棒[7], 对以后的理论和研究起了很大作用。1944 年 R. K. Luneburg(鲁尼博格)提出一种能使无穷远物点成像的球透镜模型[8], 1954 年之后, A. S. Gutmon, S. P. Morgan 等人提出了广义 Luneburg 透镜模型, 此理论在电磁波微波区域有可能实现, 已经被应用在设计广角雷达和扫描器的天线点。60 年代出现了流动气体透镜[9], 在 60 年代末期, 人们用离子交换工艺制作了自聚焦透镜, 且有了实用价值, 这促进了光通信、光子计算机、微光学的发展。80 年代 Arai、Rinmer 和 Sharma 等人分别提出了计算光程的不同方法, Roger 和 Harrigan 等人也提出了 Y-Y 对角线理论和方法[3]。

在我国对梯度折射率材料的研究起步较晚, 1974 年, 用离子交换法制成了实验样品自聚焦透镜, 经过十几年的研究在分辨率方面有了很大的提高。1991 年刘德森等人应用两步电场辅助下的光刻离子交换工艺制成了球形平面微透镜阵列。到 1999 年采用离子交换法制作自聚焦透镜的技术已经相当成熟, 甚至在某些性能方面已经超过日本[3]。进入 21 世纪, 他们又用平面掩膜光刻离子交换技术制造出用于大功率激光二极管阵列光束整形的平面梯度折射率微柱透镜[10], 取得的一系列成就充分体现了我国梯度折射率光学的快速发展。

目前, 梯度折射率光学器件应用广泛, 如光开关、波分复用器、耦合器、分光器、连接器、衰减器

等[6], 内窥镜及变焦镜头已广泛应用于医疗、工业、安全检查部门中, 这也显示了梯度折射率光学对人类发展的巨大作用。

3. 梯度折射率透镜的类型与原理

根据梯度形式的不同将梯度折射率透镜主要分为: 轴向梯度折射率透镜、径向梯度折射率透镜、球面梯度折射率透镜三大类型, 他们的折射率分别是定平面和定直线(轴)、到空间某定点的距离的函数, 等折射率面分别是平面、圆柱面和球面。

3.1. 轴向梯度折射率透镜

对轴向梯度折射率透镜而言, 折射率沿圆柱形材料的轴向呈梯度变化, 而在垂直于光轴的平面内折射率恒定。轴向 GRIN 透镜的制作方法主要是离子交换法、熔融/扩散法、气相扩散共聚法。其原理示意图如图 1 所示。

此折射率透镜的梯度分布表达式:

$$N(z) = N_{00} + N_{01}z + N_{02}z^2 + \dots \quad (1)$$

沿坐标方向折射率减小时或玻璃表面折射率大内部折射率小时, 称为负折射率梯度, 反之则为正折射率梯度。如果将轴向梯度折射率透镜的两个表面磨成曲面, 适当选择折射率分布和曲面的曲率, 则可校正透镜的球差。在许多光学系统中, 轴向梯度折射率透镜可在保证成像质量的同时, 减少系统光学元件的数量。例如, 美国陆军 M-19 望远镜中使用的就是轴向梯度折射率透镜[9]。

3.2. 径向梯度折射率透镜

径向梯度折射率透镜的折射率沿垂直于光轴的半径从中心到边缘连续变化, 等折射率面是以光轴为对称轴的圆柱面。光线在镜内以正弦曲线连续传播, 如果折射率从轴心到边缘连续降低, 就是自聚焦透镜(由于径向 GRIN 棒透镜从中心轴到边缘上, 折射率呈抛物线型的分布规律, 这使得两个端面为平面的单个径向 GRIN 棒透镜就具有聚焦成像的能力) [9], 相当于普通凸透镜。如果折射率从轴心到边缘连续增加, 就是自发散透镜相当于凹透镜。径向 GRIN 透镜的制作方法主要是离子交换法、溶胶凝胶法、气相扩散共聚法。其原理示意图如图 2 所示。

此折射率透镜的梯度分布表达式:

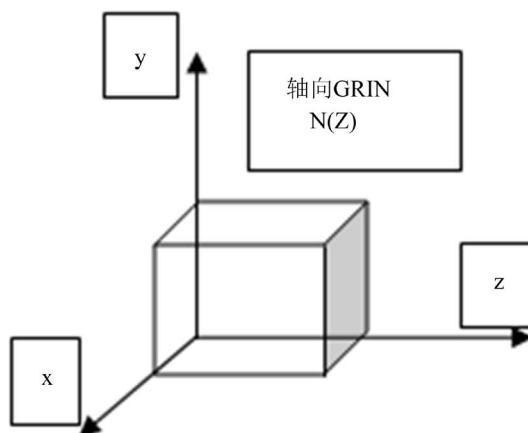


Figure 1. Axial gradient index lens
图 1. 轴向梯度折射率透镜

$$N(z) = N_{00} + N_{01}r^2 + N_{02}r^4 + \dots \quad (2)$$

其中 $r^2 = x^2 + y^2$ 。经常略去 r^4 以上的高次项, 只保留 r^2 以下的项, 这时的折射率呈现抛物线型分布, 将上式改写为:

$$n(r) = n_0 \left(1 - \frac{1}{2} \beta^2 r^2 \right) \quad (3)$$

其中: β 为折射率分布系数(有时称为聚焦系数), n_0 为光轴上的折射率, r 为离开光轴的距离。

虽然科学家们对径向梯度折射率的分布形式作了许多研究, 但实用普遍的仍是抛物线性的分布式, 并以此作为径向梯度折射率棒设计的基础。

成像系统中一般使用径向梯度折射率透镜, 这种透镜因其光线传输轨迹的特性, 也称之为自聚焦透镜, 它与阶跃型光线轨迹不同, 阶跃型与渐变型梯度折射率透镜的折射率分布示意图如图 3 和图 4 所示 [11]。

3.3. 球向梯度折射率透镜

球向梯度折射率透镜的折射率具有对原点的球面对称的分布形式, 即如果折射率分布满足:

$$\begin{aligned} n &= f(r) \\ r^2 &= x^2 + y^2 + z^2 \end{aligned} \quad (4)$$

则它属于球面梯度, 而球面 GRIN 透镜因其对球心呈对称形式且无光轴存在, 因此利用它可以完全消除径向梯度折射率透镜中离轴空间光线(非子午光线)产生的像差, 利用离子交换法制成的球面梯度折射率透镜阵列已经用于集成光学和微小光学等领域 [12]。球面梯度折射率透镜原理如图 5 所示。

Maxwell 提出的鱼眼透镜只有在它内部或表面的点能够成像, 因而难以制作和应用。球面 GRIN 透镜的制作方法主要是离子交换法、悬浮聚合法。

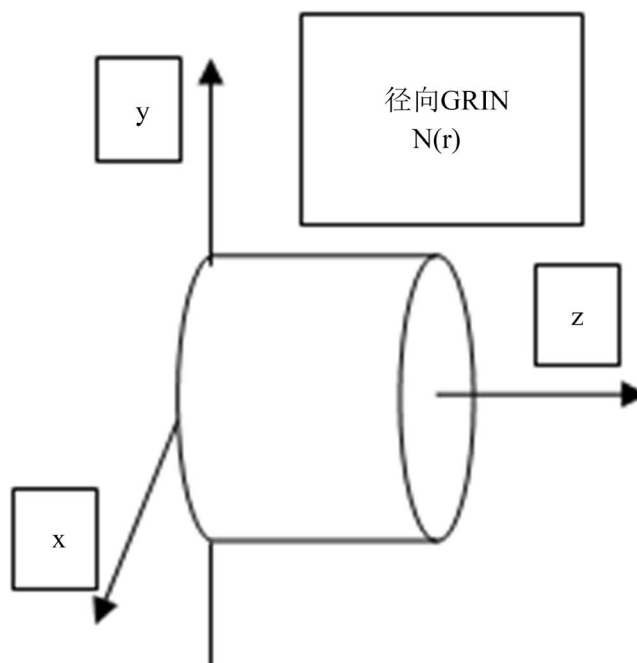


Figure 2. Radial gradient index lens

图 2. 径向梯度折射率透镜

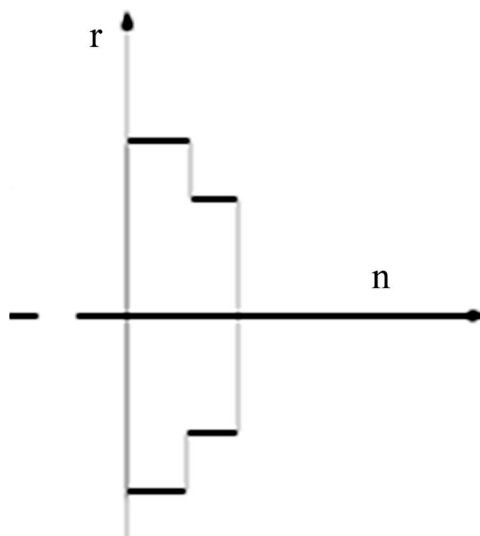


Figure 3. Refractive index distribution diagram of step-GRIN

图 3. 阶跃型梯度折射率透镜的折射率分布示意图

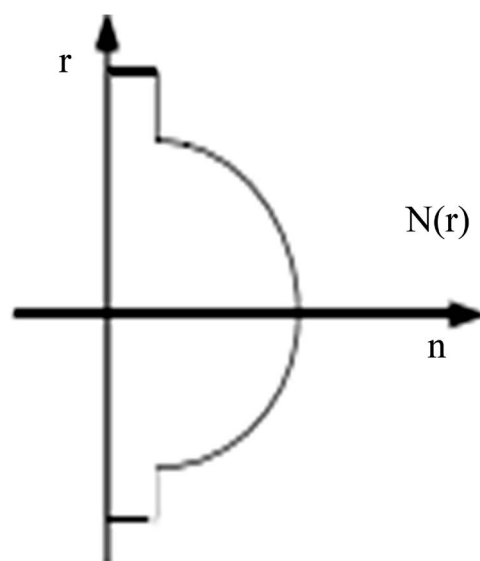


Figure 4. Refractive index distribution diagram of graded-GRIN

图 4. 渐变型梯度折射率透镜的折射率分布示意图

3.4. 梯度折射率透镜的作用(以自聚焦透镜为例)

3.4.1. 聚焦

聚焦是将平行光经过透镜后成像为会聚光，普通透镜在聚焦时不能端面聚焦，且结构复杂、聚焦光斑大，而自聚焦透镜可以做到端面聚焦，且所需的透镜数量少。普通透镜与自聚焦透镜的聚焦原理如图 6 和图 7 所示。

由图 6 和图 7 可知，自聚焦透镜可将无穷远的平行光会聚到端面上，而普通透镜则会会聚到透镜的外部，并且自聚焦透镜只需要一块透镜就可以实现端面聚焦，而普通透镜要实现一点聚焦则需要多个透镜。

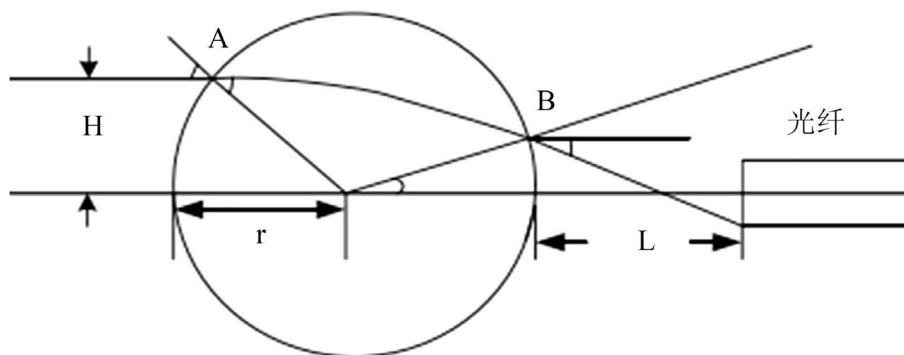


Figure 5. Spherical gradient index lens

图 5. 球面梯度折射率透镜

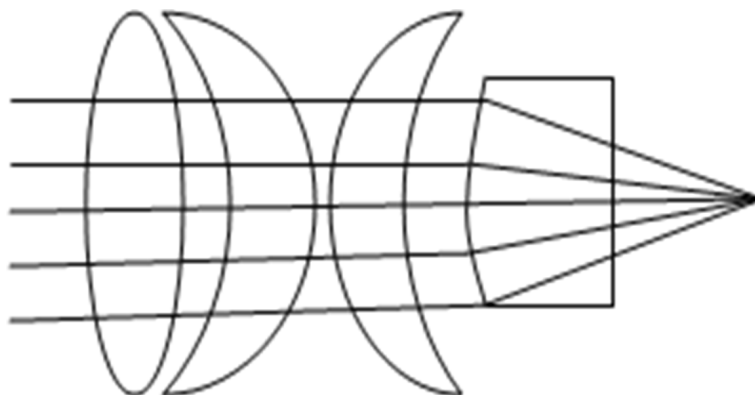


Figure 6. Ordinary lens focusing diagram

图 6. 普通透镜聚焦示意图

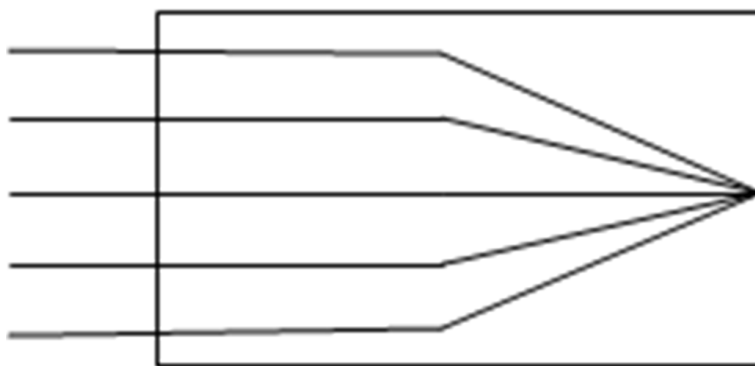


Figure 7. Self-focusing lens focusing diagram

图 7. 自聚焦透镜聚焦示意图

3.4.2. 准直

准直实际上是聚焦的反向, 即将会聚光经过透镜后成像为平行光, 如图 8 所示。

由图 8 可知, 会聚于端面的光线经过自聚焦透镜后转变为平行光。

图 9 中的两个自聚焦透镜分别是准直和聚焦的作用, 在中间加入的光学器件可以是偏振片、滤波片等。

由于自聚焦透镜聚焦和准直的特点, 它已应用于很多领域, 如光开关、耦合器、准直器、波分复用器等[9]。

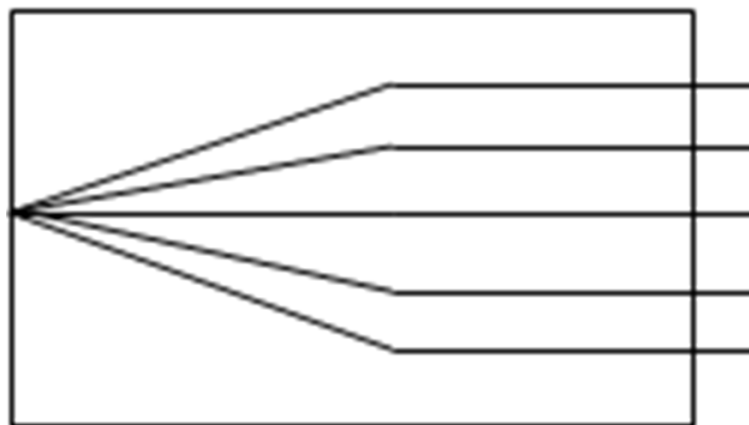


Figure 8. Principle diagram of collimating of self-focusing lens
图 8. 自聚焦透镜准直原理示意图

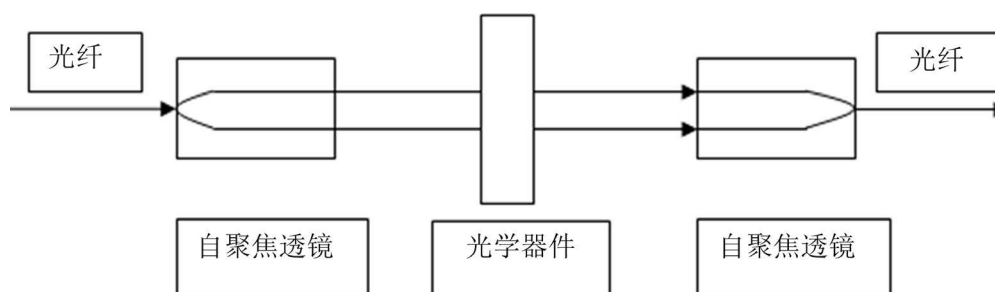


Figure 9. Principle diagram of focusing and collimating of self-focusing lens
图 9. 自聚焦透镜聚焦与准直原理示意图

3.4.3. 成像

自聚焦透镜除了具有普通透镜的成像功能以外还有端面成像的特点。医用内窥镜以及工业窥镜就是利用低色差自聚焦透镜的成像特性制成的。应用自聚焦透镜阵列传送大幅图像时，一是大大缩短共轭长度，二是呈直线排列的自聚焦透镜阵列在整条直线上的成像分辨率相同，并且整个视场的传递函数值比较均匀，极大地提高成像质量，所以自聚焦透镜阵列是复印机、传真机等仪器设备的重要器件[9]。

4. 梯度折射率透镜的制备方法

梯度折射率透镜是由梯度折射率材料制成的，且材料与元件的制作同步进行。按化学成分来分，梯度折射率材料分为无机材料和高分子材料两大类。离子交换法制作的梯度折射率棒达到实用水平，它的优点是透过率及分辨率高，折射率差大，像差、色差小，但是比重大，尺寸小，冲击强度差，制作过程较复杂。其余方法如化学气相沉积法、溶胶-凝胶法、光刻-离子交换法、分子填充法、晶体增长法、扩散法、扩散共聚法等。

4.1. 离子交换法

离子交换法利用的是玻璃中离子的扩散性，使它们与外来的阳离子发生置换，逐步形成所交换离子的浓度梯度，以便造成玻璃中阳离子浓度梯度，需要注意的是置换温度不可高于玻璃的退火温度，否则导致玻璃失透。二价阳离子或更高价的阳离子不参与置换反应(在溶胶-凝胶法中得到解决)，但是高价阳离子对一价的交换有些许影响[13]，在置换作用时适当的加入一些场强较大、与 O^{2-} 间距较小的氧化物，可以起到改善径向梯度折射率的作用，同时可外加电场以提高交换速率[14]。

4.2. 溶胶 - 凝胶法

这种方法于上世纪 80 年代出现, 是以金属醇盐为原料制作出来的。先把基质玻璃和掺杂物质溶解成为溶胶液体, 使其凝胶化后做成棒体, 再溶出其中的掺杂物质, 以便有梯度分布, 再经干燥、烧结等过程, 固定其梯度组分。

Koone 等人用溶胶 - 凝胶法制备了 Nd 掺杂的发散和会聚透镜[15]; Huang R L. 等用溶胶 - 凝胶法制备了 TiO_2 - SiO_2 和 Y_2O_3 - TiO_2 - SiO_2 两个系统的玻璃材料[16]; 吕文生等人也用溶胶 - 凝胶法制备了 K_2O - PbO_2 - B_2O_3 - SiO_2 系统梯度折射率玻璃材料, 凝胶干燥时开裂是溶胶 - 凝胶法制备方面的一大阻碍, 吕文生提出的使用二甲亚砷作溶剂制备的方法不易开裂, 还有人认为适当提高醇盐水解温度, 可帮助排除残余乙醇和水分, 减小应力因素, 对防止开裂也有一定帮助[17]。

4.3. 化学气相沉积法

拉制光纤预制棒一般采用化学气相沉积法制备的梯度折射率材料制备, 把具有不同折射率的材料逐层地沉积于管内壁或圆棒外, 得到折射率呈阶梯型分布的材料。它使气相 SiCl_4 氧化产生无定形 SiO_2 亚微米颗粒, GeCl_4 和 PoCl_3 作为掺杂剂的前驱体。化学气相沉积法已经有 OVD (棒外气相沉积)、VAD (垂直轴向沉积)、MCVD (管内化学气相沉积)、PCVD (等离子体化学气相沉积) 等方法。

4.4. 光刻 - 离子交换法

1980 年初期, 日本伊贺健一等人提出了光刻 - 离子交换法。在基质玻璃板表面上制作 1~2 μm 厚的掩蔽层, 再用光刻法作成排列规则的圆形开口阵列, 把基板放入熔盐中进行离子交换, 也可外加电场来加快离子交换速率。

对比以上四种方法, 离子交换法经过几十年的研究, 制作工艺已经成熟, 但是由于扩散能力有限, 应用主要局限于微型的光学系统。溶胶 - 凝胶法使二价阳离子或更高价的阳离子参与置换反应, 并且扩散速度大大加快, 但是它的折射率梯度和尺寸不易控制。化学气相沉积法的出现使双坩埚技术被淘汰[18]。光刻 - 离子交换法可一次制成梯折平面微透镜阵列, 但是基板制作过程比较复杂。

大部分梯度折射率材料的制备方法不成熟, 目前国外在进一步研究改进和使之实用化, 我国虽然在制备方面取得了很大进展, 但与国际水平相比还有较大的差距。

5. 梯度折射率透镜的应用

随着梯度折射率透镜的发展, 它的应用范围也逐渐扩展, 例如医学、通信、工业等, 梯度折射率透镜在这些方面起着重要的作用。

5.1. 医学领域

在科技发达的今天, 科学家们也在逐渐探索更精密、更智能化的医用仪器, 这不仅为人类减轻了痛苦, 同时提升了效益。鉴于梯度折射率透镜质量轻、体积小且像质好的特点, 制成了医用内窥镜。医用内窥镜分为软性(管腔)和硬性(自由空间式), 软性有很大的视场, 因为视场的影响观察出来的图像可能有很大的失真, 所以为了可以正常观察到图像, 需要有很严重的桶形畸变, 在硬性内窥镜中为了校正像差, 可使用非球面透镜或轴向梯度折射率透镜[19]。随着科学技术的发展内窥镜也朝着多样化、智能化、精细化方向发展[20]。

1) 检查关节的内窥镜

起初的关节镜是由三片式反元距物镜制成的[21], 且是均匀折射率透镜, 梯度折射率透镜的应用, 不

仅由一片透镜代替了原来的三片,而且是非均匀透镜,即简化了结构又提高了像质,减轻了病人的痛苦。但是在应用中也存在着损耗,如光纤弯曲、失配损耗、反射损耗等等[21],这为以后的研究指出了道路。

2) 口腔内窥镜[22]

口腔内窥镜是由 GRIN、CCD 光电转化器、图像控制单元、电子病历等模块组成的,利用 GRIN 分辨率高、成像景深大的特点,采用修正折射率剖面的 GRIN,降低了系统的渐晕,减小了畸变,以便获取更多口腔内部的图像。

在医学领域中除了将梯度折射率透镜制成内窥镜,还用于显微镜物镜,这对医学工作者检查微小物体产生了很大作用。

5.2. 通信领域

光纤通信系统得到迅速发展,它正在使整个通讯系统发生一次革命[23],光通信的特点是容量大、速率快。径向梯度折射率光纤主要用于光波的载体,它是光通信的理想传输介质,由于自聚焦透镜具有聚焦、准直、端面成像的特点,所以它在光信息处理、光通信器件、传感系统等领域有着广泛的应用[1],例如光纤准直器、波分复用器、光开关等一些光学组件[24],并且径向梯度折射率透镜的应用范围最广。在某种程度上降低了成本,尤其是一些器件明显的实现了微小化。

在光纤准直器中的应用[25],光纤准直器主要应用了自聚焦透镜的准直原理,它由 1/4 节距的自聚焦透镜和单模光纤组成,GRIN 的作用是对高斯光束进行准直,来提高光纤与光纤间的耦合效率,当然在提高耦合效率的同时,自聚焦透镜的引入也使光纤准直器产生了插入损耗和回波损耗,控制好透镜的长度尽量减小插入损耗,增大回波损耗,来减少反射光对光源和系统的影响。

5.3. 工业领域[26]

现实生活中工业管道表面会出现裂纹、毛刺、腐蚀以及杂物等现象,我们可以用管道内窥镜来进行诊断,诊断过程中不需要高的分辨率。管道内窥镜是根据 GRIN 的光学性能与显微镜相结合制成的,众所周知,显微镜在管道内窥镜中有着重要的作用,而且显微镜的放大倍率越大、测试准确度越高,其景深也就越小[27]。而管道内窥镜需要大景深,所以经过 GRIN 与显微镜的结合,即实现了大景深(几何景深与物理景深均增大),而且也有大的放大倍率。管道内窥镜与 CCD 等器件结合后即实现了内窥镜的数字化,也可以更方便的观察图像。

5.4. 大科学装置 LAMOST 望远镜中的应用

梯度折射率透镜在天文上的应用不是很广泛和成熟,但特殊的性能确实会提高望远镜的耦合效率。我国 LAMOST 望远镜从建立之初开始一直受到国内外的广泛关注,装置如图 10 所示,它也为科学家提供了大量的有关宇宙的有关数据[28]。但是它存在着耦合效率低的缺点,所以尽快提高耦合效率可以获取更多有助于天文科学家对宇宙进行研究的的信息。梯度折射率透镜具有准直、聚焦和成像的功能,我们在 LAMOST 中应用 GRIN 透镜可改善由于当星像光斑大于光纤芯径时星像光斑不能完全耦合进光纤导致的效率损失。

1) 当星象光斑直径大于光纤直径尺寸时,利用 GRIN 的自聚焦功能,能较好的将星象耦合进光纤,大大提高光纤和星象的耦合效率[29],原理如图 11。

2) 在焦面光纤入射端梯度折射率和光纤耦合装置,除提高光纤和星象耦合效率外,同时能改善由于光纤不能正入射导致的效率损失[29]。

而光纤入射端 GRIN 的引入,必然引起光纤的焦比退化,为此需要在光纤的出射端加入另外一套光

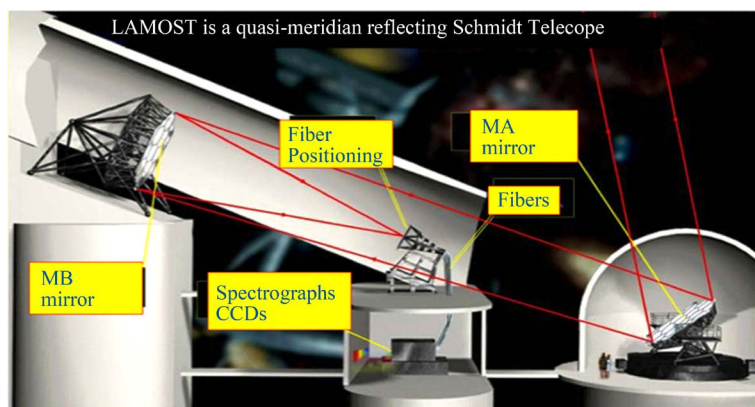


Figure 10. LAMOST telescope

图 10. LAMOST 望远镜

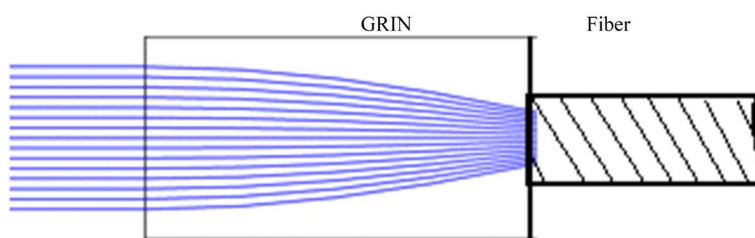


Figure 11. Focusing diagram of parallel incident light in GRIN

图 11. 平行光入射梯度折射率透镜时的聚焦示意图

学系统以进行焦比匹配。

6. 结论

本文从梯度折射率透镜的发展史、三种主要类型(即轴向梯度折射率透镜、径向梯度折射率透镜、球面梯度折射率透镜)的原理、梯度折射率透镜的作用和四种主要制备方法、以及 GRIN 在不同领域的应用几个方面进行阐述, 通过比较各方面的特性和应用, 可知不同类型、不同特性的 GRIN 透镜在不同领域有着广泛的应用。由于梯度折射率透镜体积小、易加工、耦合效率高等的特殊性能, 相信以后在很多领域它将会被广泛应用。

基金项目

国家自然科学基金青年基金(1014-515029111); 中央高校基本科研业务费(2015B27114)。

参考文献 (References)

- [1] 刘德森, 高英俊. 变折射率介质的物理基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 1991: 1-2.
- [2] 乔亚天. 梯度折射率光学[M]. 北京: 科学出版社, 1991: 1-3.
- [3] 邵瑞, 陈力. 梯度折射率光学的发展现状[J]. 巢湖学院学报, 2006, 8(3): 59-61.
- [4] 陈力, 邵瑞. GRIN 聚合物微球用作平行光束至光纤的耦合器的耦合性能研究[J]. 安庆师范学院学报, 2006, 12(3): 54.
- [5] Piechal, B., Bercha, A., Dybala, F. and Trzeciakowski, W. (2014) Gradient Index Collimator Lens for High Pressure Applications. *Review of Scientific Instruments*, **85**, 063105.
- [6] 乔亚天. 梯度折射率光学与通信[J]. 西安邮电学院学报, 1996, 4(3): 6-7.
- [7] Wood, R.W. (1905) *Physical Optics*. Macmillan, New York.

- [8] Luneberg, R.K. (1966) Mathematical Theory of Optics. *American Journal of Physics*, **34**, 80-81. <http://dx.doi.org/10.1119/1.1972799>
- [9] 万腾. 梯度折射率透镜传输特性研究及光纤耦合系统设计[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安电子科技大学, 2009: 14-19.
- [10] 胡建明. 大功率激光二极管阵列光束整形的平面变折射率微柱透镜[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 西南师范大学, 2002: 11-12.
- [11] Tomlinson, W.J. (1980) Applications of GRIN Rod Lens in Optical Fiber Communication Systems. *Applied Optics*, **19**, 1127-1138. <http://dx.doi.org/10.1364/AO.19.001127>
- [12] 王耀祥. 光学玻璃的发展及其应用[J]. 应用光学, 2005, 26(5): 61-66.
- [13] 王耀祥, 马成义, 章兴龙. 二价 Ba^{2+} 、 Pb^{2+} 和四价 Ti^{4+} 在硼硅酸盐玻璃系统中对 Li^{+}/Na^{+} 离子交换影响[J]. 光子学报, 2000, 29(3): 260-262.
- [14] 杨舟, 卢安贤, 等. 梯度折射率玻璃的研究现状与进展[J]. 材料导报, 2005, 19(5): 17-18.
- [15] Koone, N.D. and Zerda, T.W. (1995) Diffusion and Optical Properties of Nd-Doped Sol-Gel Silica Glasses. *Journal of Non-crystalline Solids*, **183**, 243-251. [http://dx.doi.org/10.1016/0022-3093\(94\)00567-2](http://dx.doi.org/10.1016/0022-3093(94)00567-2)
- [16] Huang, R.-L., Ruan, S.-K., Kang, Z.-C. and Su, M.-Z. (1995) Radial Gradient-Index Glass Prepared by the Sol-Gel Process. *Materials Research Bulletin*, **30**, 543-548. [http://dx.doi.org/10.1016/0025-5408\(95\)00033-X](http://dx.doi.org/10.1016/0025-5408(95)00033-X)
- [17] 吕文生, 周世珪, 杜新民, 沈定坤, 陈幼新. 溶胶-凝胶法制备 $K_2O-PbO_2-B_2O_3-SiO_2$ 系统梯度折射率材料[J]. 玻璃与搪瓷, 1995, 23(2): 1-5.
- [18] 刘泽, 李永祥, 吴冲若. 采用溶胶-凝胶法制备梯度光学功能材料[J]. 东南大学学报, 1998, 28(2): 21-25.
- [19] 友清. 轴向梯度折射率材料在光学透镜中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 1998, 35(2): 26-29.
- [20] Davis, C.J. (1992) A History of Endoscopic Surgery. *Surgical Laparoscopy & Endoscopy*, **2**, 16-23.
- [21] 吴琼, 向阳, 侯利杰, 陶雪, 孙铭礁. 基于梯度折射率透镜的关节镜光学系统设计[J]. 应用光学, 2012, 33(5): 944-948.
- [22] 张宇, 秦明新, 罗二平, 李志宏. 梯度折射率透镜在口腔内窥镜中的设计与应用[J]. 应用光学, 2006, 27(6): 531-532.
- [23] 李林. 应用光学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2010: 228-229.
- [24] 张强. 梯度折射率透镜在光纤耦合系统中的应用[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安电子科技大学, 2008: 5-6.
- [25] 朱少丽, 徐秋爽, 刘德森. 自聚焦透镜在光纤准直器中的应用分析[J]. 西南师范大学学报, 2004, 29(3): 379-382.
- [26] 郭俊, 马永利, 张璐, 赵翠玲, 王文生. 基于梯度折射率透镜的管道内窥镜设计[J]. 光子学报, 2010, 39(10): 1780-1784.
- [27] 郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 58-63.
- [28] Cui, X.-Q., Zhao, Y.-H., Chu, Y.-Q., et al. (2012) The Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopic Telescope (LAMOST). *Research in Astronomy and Astrophysics*, **12**, 1197.
- [29] Palais, J.C. (1980) Fiber Coupling Using Graded-Index Rod Lenses. *Applied Optics*, **19**, 2011-2018. <http://dx.doi.org/10.1364/AO.19.002011>

再次投稿您将享受以下服务：

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>