

光学新分支——梯折光学

陈 瑞 芳

梯度折射率(下面简称梯折)光学,是近些年来引人注目的一门光学分支学科。它的发展已有一百多年的历史。Maxwell 鱼睛透镜、Wood 透镜、Luneburg 透镜以及梯折透镜的研制成功都是梯折光学发展史上的重要里程碑。然而只有在近十几年来,随着计算机科学的发展;像差理论和计算方法的不断完善;梯折材料的研制成功以及测试方法的改进等,梯折光学才有可能在实际上有所应用。1979年美国召开了第一次梯折光学及其材料的专题会议,以后几乎每隔1—2年召开一次。使该课题成为国际上引人注目的一门光学分支学科。七十年代,中科院西安光机所在龚祖同教授和薛鸣球教授等的领导下开展的有关研究课题已取得了很大的成就,使梯折棒透镜在光纤通讯中开始实际应用。八十年代中,上海光学仪器研究所庄松林研究员的领导下,进行了梯度折射率材料及其应用的研究,经过几年的努力,在材料的梯度深度和梯度大小方面取得了可喜的进展,并对光线在梯折介质中的传播规律和成像原理进行了研究,为梯折材料在光学仪器中的实际应用打下了良好的基础。

什么是梯折光学和梯折材料

在通常的光学系统中,每个光学零件的折射率(nD)可以认为是一个常数。这是因为每种材料各有恒定的组分和均匀的结构缘故。在设计光学系统时,设计者可以采用各种曲率、不同厚度、多种折射率材料以及不同几何形状组合的光学零件,使透镜系统

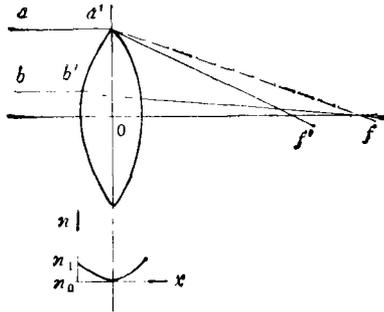


图1 单片梯折透镜消除球差

具有最佳的光学性能。为此,需要复杂的光学系统;应用非球面光学零件虽可简化光学系统,减少镜片的数量,但非球面零件的加工在技术上要求高,而且大量的

工作还需用手工去完成,这与近代的工业生产是不相适应的。随着科学技术的发展,人们研制成功一种特殊的光学材料,在这种材料内部,它的折射率不是一个常数,而可以连续地、有规则地变化,是空间位置(x, y, z)的函数。我们称这种材料为梯折材料,称由这种材料制成的透镜为梯折元件。人和昆虫的眼睛就是以梯折介质构成的天然透镜。研究光线在梯折介质中的传播规律,成像原理,像差的分析与计算,色差的消除以及梯折光学系统的实际应用等则是梯折光学研究的对象和任务。在光学系统中采用梯折元件与采用一般光学零件相比,除通过曲率的变化来改变光程外,还可通过折射率的变化达到改变光程的目的。为设计者提供了一个新的自由度。图1是一个简单的光学系统,图中的球面透镜如果用通常的光学材料制成即这种材料内部的折射率是均匀的,那末远轴光线 aa' 和近轴光线 bb' 在通过透镜以后不能聚焦于一点,这就是我们平常所说的球差。但如果图中的透镜用梯折材料制成,而它的折射率按图中所示的抛物线状分布,则远轴光线 aa' 和近轴光线 bb' 在通过透镜后便有可能相交于一点。于是,单片透镜就消除了球差。据计算,如果采用梯折材料,可把原来需要六片的双高斯照相物镜减少至二片而不影响成像质量;一个变折射率单片可制成一个 $f/6.3, \omega = 25^\circ$ 的照相物镜,并校正了球差、子午及弧矢场曲。因此,在光学仪器中采用各种类型的梯折元件及其组合,便可大大地简化光学系统,消除像差,缩小体积,减轻重量。

梯折的基本类型及其特性

按照折射率的变化规律,梯折可分为四种基本类型。一种是轴向梯度。其折射率沿光轴作有规则地连续地变化,等折射率面是一系列与光轴垂直的平面。可用于大孔径物镜的设计和代替非球面光学零件等方面。一个单球面轴向梯度透镜等效于一个斯密特校正板。

另一种是径向(或圆柱形)梯度。它的折射率是径向距离的函数,等折射率面是与光轴相对应的无数圆柱面。径向梯度的平面透镜具有使物体的像放大或缩小的功能;一条径向梯度棒可等效于一个转像组。

第三种是层状梯度。其折射率是在一个垂直轴方向上变化,等折射率面是平行于光轴的一系列平面。

层状梯度介质具有柱面镜的作用,可作为一维放大率器件;还可等效于一个偏转稜镜。

第四种是球面梯度。其折射率分布有一对称点,等折射率面是一系列以对称点为中心的球面。如 Maxwell 鱼睛透镜和 Luneburg 透镜。Maxwell 鱼睛半球可视为一个聚焦透镜,它能使平行光束聚于表面上一点,也可使同心光束变成平行光线。

梯折的产生方法

一种物质的折射率是由组成该物质成分分子体积和分子折射度两个因素的影响决定的,而分子体积与组成微粒的半径 R 有关;分子折射度与组成微粒的电子极化率 ρ 有关。因此,我们可以把某一成分对该物质折射率贡献的大小用比值 $Q = \rho/R^3$ 来衡量。 Q 值愈大对折射率贡献亦大。如果我们能设法使均匀介质中某一 Q 值大(或小)的成分的浓度得以改变,用另一种 Q 值小(或大)的成分来替代,而且这种改变和替代都遵循一定的规律,那么便可通过此途径达到折射率按一定规律变化的目的。

产生梯折的方法有离子交换法;晶体生长法;中子辐照法;化学气相沉积法;离子填隙法和真空镀膜法等。其中特种玻璃的离子交换法是研究得较多且具有应用前景的一种方法,由于离子交换在熔体中进行,交换反应是瞬间完成的,所以离子交换过程的速度主要取决于玻璃体内离子的扩散速度。对于某一离子在交换过程中的径向扩散可用扩散方程来描述

$$\frac{\partial C}{\partial t} - D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} = 0$$

式中 D 为扩散系数; C 为浓度; t 为时间; x 为径向扩散距离。

由于离子浓度 C 的变化所引起的折射率 n 的变化呈线性关系,所以扩散方程中的变量 C 可直接用变量 n 来代替,经过变换并控制扩散时间,当交换刚好到达样品中间时,便可得:

$$n(x) = n_0 \left(1 - \frac{1}{2} Ax^2 \right)$$

即沿 x 方向,由离子交换扩散所产生的折射率变化近似呈二次抛物线状分布。式中 A 是折射率分布常数。其值的大小取决于玻璃的组分,离子交换的工艺参数以及样品的尺寸等。

梯折的测试和应用

对于梯折介质的测试项目有梯度的分布特性、梯度透过率、梯度色散,数值孔径以及离子浓度的变化等。

测试的方法有干涉法、散射法、反射法、全息照相法、扫描电镜法以及离子探针法等。

其中梯度的分布特性是表征梯折介质极其重要的

一个参数,它与光线的传输特性,色散特性,传输的模总数以及成像的特性等有关。用马赫-泽德干涉仪测试梯度的分布特性是一种较简单而精度又较高的测试方法,其测试原理如图 2 所示。

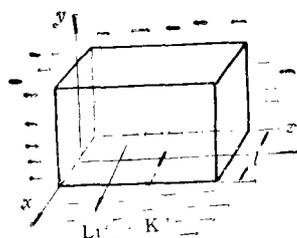


图2 干涉法测试原理

一种较简单而精度又较高的测试方法,其测试原理如图 2 所示。单色光由 BS_1 分成两路, M_1, M_2 为反光镜,厚度为 l 的梯折样品放在经 M_1 反射后的光路上,这样两路光线在 BS_2 相

会处就会产生程差并发生干涉,在照相底板上可见明暗相间的同心圆状干涉条纹,出现亮环的条件是

$$\Delta = k\lambda, (k = 1, 2, 3, \dots)$$

k 表示从中心向边缘计算的亮环数目,二亮环之间的折射率差 $\Delta n_1 = \lambda/l$,第 k 个亮环和中心亮环之间的折射率差 $\Delta n_k = k\lambda/l$ 。(二式中的 λ 为测试光波长),这样只要知道轴中心处的折射率,数出亮环的数目,就可算出该亮环所对应处的折射率,从而求得折射率的分布(如图 3)。

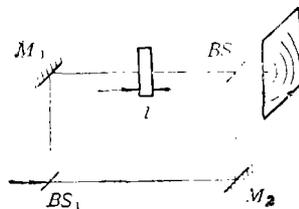


图3 沿 x 方向梯折分布

普通光纤由于具有透过性良好,直径可小(几微米),可大(几十至几百微米),柔软可弯曲等优点,在传像、导光、折像以及激光通讯传输方面有重要的应用已为大众所熟识。梯折光纤由于它本身的特点在这些应用中更显示出它的优越性。这是一种长为几千米,直径为 20--100 微米的长纤维,折射率自中心向边缘由高到低呈径向变化。如果我们恰当地选择一个折射率的分布,可使光线在纤维内呈正弦轨迹传播。这与光在一般光纤中靠全反射方式进行传播有明显的区别,光在梯折纤维中传播,损失的能量少,传播的距离较远,且单根纤维就能成象。

梯折材料还可应用于成像目的。光在梯折介质中的传播轨迹一般不是直线,而是根据折射率的分布特性以比较复杂的形式传播。以折射率呈二次抛物线形式分布的径向梯折玻璃板为例,光线在该介质中的传播轨迹可通过解下列光线方程得到。

$$\frac{d}{ds} \left[n(x) \frac{dr}{ds} \right] = \frac{dn}{dx}$$

式中 r 是光线在传播方向上某一点的位置矢量, $n(x)$ 为梯折介质的折射率, ds 是沿光线的弧度长度的一个微学元。根据一些典型光线的定解条件,如光

宇宙之中,从地球磁层、恒星大气、活动星系到类星体,到处都存在着等离子体,它们经常产生爆发现象。这种宇宙等离子体爆发的最普遍特性,是能量脉冲式的释放,以及粒子被加速到非常高的能量。在许多情况下,爆发的能量大部分以高能粒子的形式输出。在形形色色的宇宙爆发现象中,最

太阳高能耀斑: 粒子加速和核反应

吴铭蟾

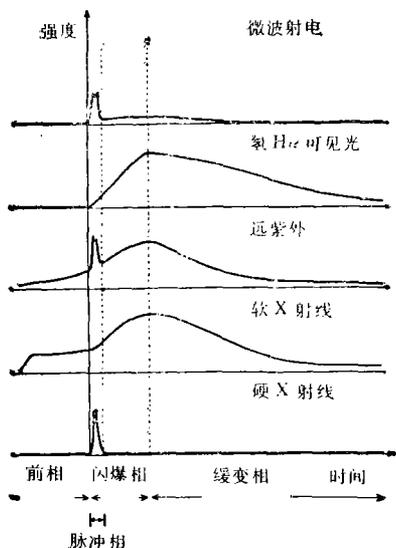


图1 太阳耀斑爆发在不同波段辐射强度随时间变化的示意图

经常发生也是最容易被研究的要算是太阳耀斑。

太阳耀斑是太阳大气局部空间中的爆发现象,在观测上表现为从射电波、可见光,紫外线和软硬X射线的辐射流量的突然性爆增,(见图1)。在电磁辐射爆增的同时,还伴随大量高能粒子和等离子体的喷发,物质凝固的抛射以及激波的传播等多种效应。

一个大耀斑的空间尺度只有 10^4-10^5 公里,时间尺度也只有 10^2-10^3 秒,而释放的总能量可高达 10^{32} 尔格的量级。也就是说,每秒释放 10^{29} 尔格的能量。在如此有限的空间范围,如此短促的时间内突然释放那么多的能量并迅速转换和传输,实为太阳大气中的高能现象。

当今,太阳物理学上比较流行的看法是,耀斑的能量是储存在太阳大气强磁场中的非势能,通过磁对消和重联的方式突然释放出来。第21太阳活动周(1976—1986年)期间,耀斑研究的最大进展是:在大量耀

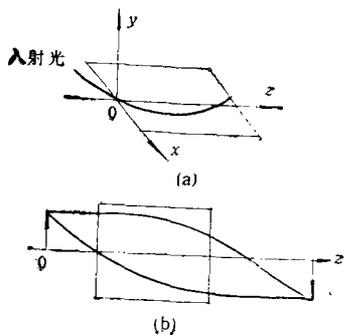


图4 光在 xoz 平面轨迹及成像原理

线从 xoy 平面入射,求出平行于 xoz 平面的入射光线的传播轨迹及它们的成像原理如图4所示。

通过改变物体的位置,调整梯折元件的尺寸以及梯度分布特性等因素,我们可以根据设计要求得到不同的象质,如正、倒立像;放大、缩小像以及虚、实像等。

由于梯折透镜可以作得很小,其光学特性是棒长的周期函数,而且消像差性能好,因此在光学仪器特别是在微型光学仪器中有重要应用。如利用低色差梯折

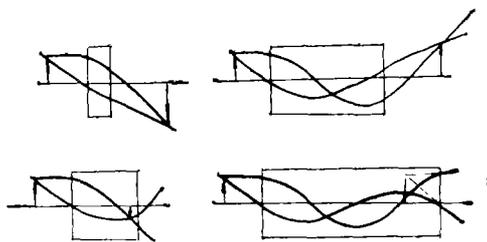


图5 梯折介质所成的各种像

棒透镜的医用内窥镜;将梯折微透镜作成网络板,可用于复印机、高速摄影机等性能都很好。

梯折光学经过十几年的发展,已为我们展现了美好的前景,要达到完善的目标还有很多的工作要做,诸如,合乎各种规格要求的梯折材料的制造;适用于任意梯折元件光学系统的光线追迹程序的确立;精确的测试方法的研究;高级像差的分析与计算以及色差的消除等都有待于梯折光学工作者的进一步努力。