

变折射率光学的发展

林 中 天

区别于传统的应用光学,变折射率光学是围绕着变折射材料的发现、研究,变折射率光学元件的设计、制作和应用而开展起来的。

所谓变折射率材料,就是指折射率连续变化的光学介质。其折射率通常可以用下式表示

$$n = N_0(x) + N_1(x)\xi + N_2(x)\xi^2 + \dots$$

其中, x 是沿光轴的坐标, ξ 是任一点到光轴径向距离的平方。 $N_0(x)$ 为轴上折射率分布, $N_n(x)$ 叫作第 n 次轴外折射率分布。

近年来,进行研究比较多的变折射率材料,主要分为三种类型。首先是轴向梯度折射率,在这一类介质中,折射率是沿光轴连续变化的,其折射率表示式中的 $N_1(x)$ 、 $N_2(x)$ ……分别等于零,即

$$n = N_0(x) = N_{00} + N_{01}x + N_{02}x^2 + \dots$$

因而,介质中等折射率面是相互平行而垂直于光轴的平面簇。

第二类是径向梯度折射率(或者叫柱型梯度折射率)。其折射率从光轴垂直向外连续变化。对于这一类折射率分布,表示式中的 $N_0(x)$ 、 $N_1(x)$ 、 $N_2(x)$ ……分别为常数,即

$$n = N_{00} + N_{10}\xi + N_{20}\xi^2 + \dots$$

自然,等折射率面为同轴柱面簇。

第三类变折射率材料,称之为球型梯度折射率。其折射率是关于某一点旋转对称的。这样,等折射率面便是以这一点为球心的共心球面簇。

一、变折射率光学的发展

变折射率材料在自然界中是不乏出现的,人眼睛里的晶状体,地球周围的大气、折射率都是连续变化的。人类对于变折射率材料的观察和研究,很早就开始了^[1]。早在公元100年, Cleomedes 就开始注意和观察大气的折射现象。1587年, Tydu Brahe 对大气折射率的数值进行了实际的测量,但是当时还没有得出正确的折射定律,对大气中各处不同的折射现象尚不能作出正确的理论分析。1656年以后,人们开始假设大气是由无数共心的均匀介质层构成,并根据 Snell 定律研究它的非均匀性。现在,人们已经认识到大气折射率是关于地球中心球对称连续变化的。1975年, White 提出,大气折射率是满足

$$(nr)^k \log n = a = (n_0 r_0)^k \log n_0$$

的球型梯度分布的(其中 k 和 a 都是常数)。

虽然变折射率介质在光学系统中的应用仅是近年来的事情,然而,对于变折射率材料的光学性质的研究,或者说光在变折射率介质中传播的理论分析,却是早就开展起来了。1854年, Maxwell 成功地证明了某一类折射率适当分布的材料,可以做成一种“绝对”的光学元件,即一定的空间区域中的每一个发光点,都可以成一完善的象点。这样的光学元件一般都被考

虑成球状的，称之为Maxwell 鱼眼。现在，根据光线在变折射率介质中的传播理论、已经在数学上得以证明，这实质上是一种分布形式为：

$$n = \frac{n_0}{1 + (r/a)^2}$$

的球型梯度折射率材料，(其中， n_0 ， a 是常数， r 是到某一点的距离) 满足这样分布的介质球，球内及球面上任何一个发光点都能严格地成一象点。

1905年，Wood提出并证明，由两个平面表面构成的变折射率元件，如果折射率是径向梯度分布的，那么其作用就如同一个会聚透镜或者发散透镜，会聚还是发散取决于折射率沿径向是减函数还是增函数。当然，根据现在的近轴光线在径向梯度折射率材料的追迹公式，我们得出Wood 透镜的光焦度⁽²⁾为

$$\phi = -2N_{10}t$$

其中， t 为元件的厚度。于是，其会聚作用(或者发散作用)是显而易见的。

1944年，Luneberg 研究了一种球状的透镜模型，它能够把一束平行入射光合聚于一点。现在我们已经知道，Luneberg 透镜实质上是又一种分布形式为：

$$n = [2 - (r/r_0)^2]^{\frac{1}{2}}$$

的球型梯度折射率介质(r_0 为常数)，并且从数学上证明，入射平行光的会聚点就是通过球心的光线与后表面的交点。在那之后，有人在Luneberg 透镜成象一侧的球面上放置一面反射镜，就能使入射的平行光束经过透镜在反射镜上以相反的方向，按原光路反射出去。

除此之外，还有一些研究结果，但是一直到1969年为止，所有这一切只是停留在理论上，只是一种假设，因为当时还没有一块真正的变折射率材料被制作出来。然而，1969年，D.P. Hamblen⁽³⁾通过离子扩散法成功地做出了第一块真正的梯度折射率玻璃。从那以后，对于这种新型的光学材料的研究，就很快地开展起来了。与此同时，在变折射率光学理论，变折射率材料的测试和应用等各个方面都进行了大量的工作，有很多专著发表。

二、变折射率光学研究的现状

变折射率光学就其应用来说，可以分为两大类。第一类是变折射率元件被用于微波通讯方面。这是一种直径为大约20~100mm，长几公里的梯度折射率光导纤维，若折射率分布是满足形式为：

$$n = \begin{cases} n_0 - n_2 r^2 & r < a \\ n_1 & r > a \end{cases}$$

的径向梯度折射率(其中， r 是离光轴的径向距离， n_0 、 n_1 、 n_2 是常数， a 是纤维芯半径)。被称之为自聚焦光导纤维，即Selfoc 光纤⁽⁴⁾。如果适当地选取光纤的梯度系数，光线沿光导纤维传播时径向高度按正弦曲线周期性变化。只要发射角小于某一个极限值，就可以使光线根本不触及纤维壁。这显然不同于一般的光导纤维，依赖于纤维壁上的全内反射。于是，如果在光通讯中使用Selfoc 光导纤维，就可以根本地避免因为光纤与表皮接触面上的任何缺欠而产生的光线折返现象。更重要的是，不同方向的光线通过光纤时，虽然它们的几何路程不等，但由于折射率的变化其光程是相等的，因此所用的时间也是相等的，于是光导纤维的瞬时频带宽度提高了，或者说光纤承载信息的能力提高了。变折射率光导纤维的应用，应该说是光通讯工业的一个飞跃。

第二类是变折射率元件被用于成像系统, 这个方面的工作可以分为四个部分。第一部分是变折射率光学成像系统的理论研究和实际设计, 这涉及到光线在变折射率元件中的追迹以及象差的计算。第二部分是变折射率材料的制作。第三部分是变折射率材料的各种光学性质和机械性质的测量。最后, 是根据设计的要求, 磨制加工光学元件。

变折射率光学系统的设计基本上可以分成两个方面, 首先是理论上的分析, 这是建筑在变折射率系统中光线追迹的基础上的。根据 Fermat 原理, 在任何光学介质中, 空间光线都必须满足矢量微分方程

$$\frac{d}{ds} \left(n \frac{d\vec{r}}{ds} \right) = \nabla n$$

其中, \vec{r} 是位置矢量, ds 是路程元, ∇n 是折射率的梯度。同样, 近轴光线必须满足这样的矢量微分方程

$$\frac{d}{dx} \left(n \frac{d\vec{r}}{dx} \right) = \nabla n$$

其中, x 是沿光轴的坐标。由于介质中折射率的变化, 光线在变折射率光学元件中不是以直线形式传播的。一般说来, 这两个矢量微分方程是没有解析解的。电子计算机的使用, 使得我们有可能利用数值计算的方法来进行变折射率系统的光线追迹。近十几年来, 这个方面取得了很大的成绩。1969年, L. montegnino^[5]提出了任意变折射率介质中空间光线的追迹方法——点到点外推法。1970年, E. W. marchand^[6]对于球型梯度折射率中的光线追迹推导了一组计算公式。1975年, D. T. moore^[7]提出了空间光线在变折射率材料中的级数解法。1982年, Anurag Sharma^[8]等人对于任意变折射率介质提出了空间光线的 Runge—Kutta式逐点外推法。除此之外, 对于某些具有特殊分布的轴向、径向梯度折射率, 还推出了近轴光线的解析公式。于此同时, 1970年 P. J. Sands^[9]根据 H. A. Buchdahl 在《光学象差系数》一书所采用的方法, 提出了一组变折射率光学元件的三级象差系数的计算公式。进一步, 1976年, A. Gupta^[10]等人推导了变折射率光学元件的五级象差系数的计算公式。1978年, A. K. Ghatak 利用光学 Hamiltonian 公式^[11], 从另一个角度推导了各级象差所满足的微分方程和计算公式。在这基础上, 展开了光学系统成像质量的分析和讨论, 揭示了各级象差对于光学系统的结构参数以及梯度系数的依赖关系。根据光学设计理论, 我们知道, 每一个元件的结构参数, 最多只能控制一种象差, 随着光学精密仪器越来越高的成像质量要求, 只好增加系统元件的数量, 随之而来, 系统的体积增大了, 工艺复杂了, 造价提高了。因此, 增加单一光学元件的参数, 显然是一个发展的方向。变折射率光学元件的研究, 已经证明了, 折射率的梯度系数完全可以作为一个校正象差的新参数。于是, 变折射率材料作为一种新型的 optical 介质受到光学设计工作者的密切注视。它为光学系统的小型化开辟了一条新途径, 是很有生命力的。目前的设计研究, 主要是在轴向和径向两种变折射率材料中进行的。根据现在的研究结果, 轴向变折射率光学元件可以多提供一个自由变数——折射率梯度系数。其校正象差的作用与非球面元件很相似。径向变折射率元件可以多提供两个自由变数——折射率梯度系数和元件的厚度^[11], 因此它校正象差的能力是比较强的。

实际的变折射率光学元件的设计工作一般以两种不同的方式进行。第一种是首先适当地选取变折射率的材料和元件的形式, 然后通过空间光线计算, 利用电子计算机的优化程序逐次逼近最佳结果^[12]。这种方法是从实际象差着眼, 以实际象差为评价函数的, 能直接得到所要求的设计结果。第二种方式是根据系统的象差要求, 通过元件的三级象差与结构参数及

梯度系数的关系,来决定系统的结构形式和折射率的变化^[13]。然后进一步考虑高级象差的校正和平衡,这种方法便于分析和了解三级象差与系统的结构参数及梯度系数之间的对应关系。到目前为止,关于变折射率光学系统设计已经有很多文章发表,其中包括准直透镜^[14]、Schmidt校正板^[15]、显微物镜、照相物镜^[16]、复印机里的纤维簇^[17]及内窥镜等等。但是大多数设计工作还没有考虑色差问题(部分径向变折射率元件提出了消色差的色散要求^{[11]*})。因为变折射率光学元件的色差不仅与基本折射率 N_{00} 的色散系数有关,而且与各项梯度系数的色变化有关。然而关于变折射率材料的色变化,目前还没有什么有价值的研究成果^[1]。因而,目前仅有三种变折射率光学系统具有商业使用的意义,它们是复印机里的光纤簇,医用内窥镜以及在光通讯系统中用作连接和开关设备的梯度折射率棒(即GRIN棒^[18])。

变折射率材料的制作,长期以来,一直是变折射率材料得以应用的一个比较重要的限制因素。目前已经有六种制作技术。它们分别是:中子撞击法、化学蒸汽沉积法(即CVD)、离子交换法、离子填充法、晶体生长法和聚合法。衡量变折射率材料制作技术的标准主要指三个方面:折射率梯度的深度、折射率的最大变化量 Δn 以及材料的造价。1980年发表的各种制作技术所能达到的指标如下表^[19]

制 作 技 术	深度 (mm)	Δn
中子撞击法	0.1	0.02
化学蒸汽沉积法	0.1	0.01
离子交换法	10.0	0.04
离子填充法	50.0	0.04
晶体生长法	20.0	0.05
聚合法(主要用于塑料)	100.0	0.01

使用比较普遍的是离子交换法。1982年, J.L. Coutaz^[20]和P.C. Jausaud利用TiF₄、Schott玻璃中的Na⁺与AgNO₃的Ag⁺进行交换,获得折射率最大变化量 Δn 为0.22。

根据目前离子交换法所能达到的指标情况,设计要求的轴向变折射率元件的折射率的深度和变化量都是在制作技术范围内的,是容易实现的。然而,对于径向梯度折射率元件,如果要求光线充满孔径,元件的直径不能大于2cm^[14]。

变折射率材料的性质,需要测试的,主要有这么几个技术参数:折射率的分布,基本折射率和折射率梯度的色变化以及材料的透射率等等。目前发表的有这么几种方法:干涉法^{[21][22]}、棱镜技术、莫尔条纹法^[23]、以及反射法。普遍采用的是干涉法。由于光线在被测的变折射率样品中传播的轨迹是一条曲线。因此,在干涉光束中包括几次通过样品的光线,这就影响测试的精度^[1]。虽然,从事这方面工作的技术人员提出了不少改进措施,但是,精确地测试这些参数还是比较困难的。与变折射率元件光学设计的发展速度相比,这方面仍然是一个比较薄弱的环节。

* Paul O. McLaughlin et al. j «Design of a gradient index binocular objective»,未正式发表。

根据光学设计提出的系统元件的结构要求,把变折射率材料加工成为光学元件,显然与均匀折射率光学元件的加工有所不同。因为变折射率玻璃具有一定的对称性质,其对称轴一定要和透镜表面的光轴共线,如果不是这样,就会出现非旋转对称透镜系统所具有的象差。这是很不理想的。目前,真正投入商业使用的变折射率光学系统为数不多,因此,变折射率元件的加工工艺,还不是十分紧迫的问题。随着变折射率材料的制作技术和测试手段的日益完善,元件的加工工艺将得到进一步的发展。

目前,国内也已经开展对于变折射率光学的研究。中国科学院西安光机所已经能够利用离子交换法制作径向折射率梯度分布的玻璃纤维^{[24][25]},使用干涉法和反射法进行变折射率光纤的折射率分布以及其它参数的测试,并且在变折射率元件的光学设计理论方面进行了大量的研究^{[26]*},陆续发表了一些文章和研究结果。

三、瞻望变折射率光学的发展

变折射率材料光学性质的研究,变折射率光学元件的各种象差与结构参数及折射率梯度系数之间的关系探讨,变折射率光学元件的实际设计和使用结果,都一再证明了变折射率材料在光学系统中应用的重要意义和发展前途。正因为这样,变折射率光学已经成为应用光学的一个重要分支,受到各国光学界的普遍重视。这方面的学术交流活动也是很频繁的。1979年和1981年,分别在美国的Rochester和Honolulu召开了两次国际性的这个方面的学术大会。会议上发表了很多有价值的研究成果,提出了梯度折射率在各个方面的应用的可能。同时为变折射率光学研究的发展指出了方向。

在变折射率材料的制备方面,专业人员首先需要解决的是利用离子交换法制作梯度折射率玻璃的光学参数的控制问题,分析并掌握离子交换时的温度、交换的时间、融盐的成分、玻璃原坯的光学性质及辅加电场对于离子交换玻璃的光学参数的影响和作用。它们包括折射率的梯度系数和梯度系数的色散等等。尤其是折射率分布的色变化。实现在公差允许的范围内,获得光学设计要求的梯度折射率玻璃。其次,要进一步提高离子交换玻璃的各项技术指标。显然,目前的10.0mm的折射率深度是不够理想的,它限制了径向变折射率元件的口径。另外,应该提供光学设计更大的折射率变化范围,在离子交换玻璃的造价方面,也应尽可能降低成本,这对于变折射率材料使用的普及是很有意义的。除此之外,其它的变折射率材料的制作技术也要有所突破。

关于变折射率材料光学参数的测试,要克服测试过程中几次通过样品的光线对于测试的影响,提高参数的测试精度。这一点对于变折射率材料的使用是很重要的。当然,测试设备也应尽可能地容易实现。其次,为了适应大批量测试的需要,利用电子计算机进行干涉图样——折射率分布曲线的处理是一个发展的方向。

关于变折射率光学系统的设计,为了提高电子计算机设计的程度,进一步完善变折射率光学系统设计中所用到的计算机程序是需要的。其中包括各类型变折射率元件的波象差、光学传递函数的计算等等。逐步掌握各类型变折射率光学元件在校正象差方面的作用和特点,进一步研究方便于它们的设计方法。随着材料的制作与测试水平的提高,努力扩大变折射率光学系统的商业使用。

虽然我国的一些研究单位已经开展了变折射率光学方面的研究工作，但是在各个方面还需要进一步的努力，还有许多基本的工作要做。

纵观变折射率光学的发展，根据变折射率材料的应用和研究在科学上的重要意义和在经济上的价值，可以预计，今后的十几年，变折射率光学方面的研究将以更快的速度向前发展，并将取得更大的成绩。

参 考 文 献

- [1] Erich.W.marchand,《Gradient Index Optics》,(Academic Press, 1978), 1.
- [2] E.W.Marchand; J.O.S.A.,1976, 66, No.12, 1326.
- [3] D.P.Hamblen, u.s.patent, 1969, No.3486808.
- [4] A.K.Ghatak, K.Thyagarjan,《Contemporary Optics》,(Plenum Press,1980), 302.
- [5] L.MonLagnino; J.O.S.A.,1968, 58, No.12, 1667.
- [6] E.W.Marchand; J.O.S.A.,1970, 60, No.1, 1.
- [7] D.T.Moore; J.O.S.A.,1975, 65, No.4, 451.
- [8] Anurag Sharma et al; Appl.Opt.,1982, 21, NO.6, 984.
- [9] P.J.Sands, J.O.S.A.,1970, 60, No.11, 1436.
- [10] A.Gupta et al.; J.O.S.A.,1976, 66, No.12, 1320.
- [11] Leland G. Atkinson et al; Appl.Opt.,1982,21, No.6,993.
- [12] E.W.Marchand, D. J. Janeczko; J.O.S.A.,1974, 64, No.6,846.
- [13] D.T.Moore; J.O.S.A.,1971, 61, No.7, 886.
- [14] D.T.Moore; J.O.S.A.,1977a, 67, No.9, 1137.
- [15] D.T.Moore; J.O.S.A.,1977b, 67, No.9, 1143.
- [16] E.W.Marchand; Appl.Opt.,1980, 19, No.7, 1044.
- [17] Motoaki Kawazu, Yukio Ogura; Appl.Opt.,1980, 19, No.7, 1105.
- [18] E.W.Marchand; Appl.Opt.,1982, 21, No.6, 983.
- [19] D.T.Moore; Appl.Opt.,1980, 19, No.7, 1035.
- [20] J.L.Coutaz, P.C. Jaussaud; Appl.opt.,1982, 21, No.6, 1063.
- [21] Y.Kokubun, K.Iga; Appl.Opt.,1982, 21, No.6, 1030.
- [22] M.J.Saunders, W.B.Gardner; Appl.Opt.,1977, 16, No.9,2369.
- [23] Y.Nishizima, G.Oster; J.O.S.A.,1964, 54, No.1,1.
- [24] 李金科; 光机技术, 1977, 1—2, 74.
- [25] 西光自聚焦纤维研制小组; 光机技术, 1976, 1—2, 54.
- [26] 赵葆常, 王启忠; 光学技术, 1979, 1, 66.