

聚焦法测量梯度折射率透镜 的折射率分布

彭汉俊 朱秋东 苏大图
(北京理工大学工程光学系)

提 要

本文针对梯度折射率分布的透镜(以后简称梯折透镜)与光纤在折射率分布上的不同点,对用于光纤及其预制棒测量的聚焦法的原理公式,计算测量方法等进行了重要改进,从而使聚焦法可适用于梯折透镜的测量。本文通过计算机模拟计算,对原理公式及计算方法的准确性和可靠性进行了验证,并同时给出了这一测量方法的精度,最后给出了测量实例及其比较结果。

关键词: 折射率测量; 梯度折射率透镜。

由 D. Marcuse 于 1979 年提出的聚焦法^[1]是通过测量一束垂直于光纤被测件剖面中心轴入射的平行光经在剖面内传播后出射时的偏转角,来计算剖面内的折射率分布。这一方法已成功地用于光纤及其预制棒的测量中^[2,3],但对梯折透镜,由于其与光纤的用途及制造方法不同,二者的折射率分布结构有较大差别,为此文中针对聚焦法在梯折透镜折射率分布测量中所遇到的问题进行了讨论分析,提出一些解决办法,以期实现聚焦法对梯折透镜的测量。

一、测量原理

1. 原理公式的讨论

D. Marcuse 在其聚焦法中所采用的计算公式^[1]基于两个假设条件,其中之一是:剖面中心折射率与边界折射率之差 Δn 很小(一般是 $\Delta n \leq 0.02$),这一假设条件使得公式仅适用于 Δn 很小的折射率分布,而梯折透镜的折射率差 Δn 一般在 0.04 左右^[4],最大可达 0.22^[5],因此,需重新推导原理公式,以适用于梯折透镜的测量。

如图 1 所示,设剖面折射率为圆对称分布,当匹配液折射率 n_0 等于边界折射率 n_a 时,入射光线高为 y 时,出射偏转角为 $\varphi(y)$,其在剖面内的传播轨迹如图 1 中的实线所示。

根据图 1 中的几何关系,以及光线在此种折射率分布情况下的传播规律^[6],可得到折射率分布 $n(r)$ 与出射光线偏转角 $\varphi(y)$ 关系为:

$$\varphi(y) = 2n_0 y \int_{r_0}^a \frac{d \ln n(r)}{dr} \cdot \frac{dr}{(n^2(r) \cdot r^2 - n_0^2 y^2)^{1/2}}, \quad (1)$$

对(1)式取阿贝积分变换,可得 $n(r)$ 的计算公式为:

$$n(r) = n_0 \cdot \exp\left(-\frac{1}{\pi} \int_{r'}^a \frac{\varphi(y)}{(y^2 - r'^2)^{1/2}} dy\right) \quad (2)$$

$$r = \frac{n_0}{n(r)} \cdot r' \quad (3)$$

(2)、(3)式正是我们所需要的可适用于较大折射率差测量的原理公式。

2. 匹配液的与边界的折射率不等时的考虑

(2)、(3)式是在 $n_0 = n_a$ 情况下得到的, 但对于边界折射率一般是未知的梯折透镜, 在测量中很难做到 $n_0 = n_a$

当 $n_0 \neq n_a$ 时, 由于光线在边界处的折射, 入射高为 y 的光线在剖面内传播后(其传播轨迹如图 1 中虚线所示), 将在 P_2' 点出射, 其偏转角为 $\varphi'(y)$, 显然, 它与 $n_0 = n_a$ 时的出射光线偏转角 $\varphi(y)$ 不等。

根据图 1 中的几何关系及折射定律, 可推知 $\varphi'(y)$ 与 $\varphi(y)$ 之间的关系为:

$$\varphi(y') = \varphi'(y) + 2[\sin^{-1}(y/a) - \sin^{-1}(n_0 y/n_a \cdot a)], \quad (4)$$

$$y' = n_0 \cdot y / n_a \quad (5)$$

当 $n_0 \neq n_a$ 时, 根据入射高为 y 的光线偏转角 $\varphi'(y)$, 从(4)、(5)式可计算出对应于 $n_0 = n_a$ 时, 入射高为 y' 的光线偏转角 $\varphi(y')$ 。

为消除 $n_0 \neq n_a$ 时所带来的影响, 在测量中, 先根据对被测件所估计的边界折射率近似值, 使所调制的匹配液折射率与棒边界实际折射率大致相等(折射率差 $< 5 \times 10^{-3}$), 然后, 对测得的偏转角采用逐次逼近的计算方法, 即先将匹配液折射率值与偏转角的测量值一并代入到(2)、(3)式中, 从而可计算出一组折射率分布值, 以它们的边界折射率值及按此值利用(4)、(5)式修正后的偏转角值, 再代入到(2)、(3)式中计算, 这样每计算一次, 其计算出的边界折射率值便向实际值靠近一步, 如此反复, 直至前后两次计算的边界值相差很小(如小于给定的精度值 Δ)时, 便可认为最后计算出的为所测棒的折射率分布。

3. 测量原理的模拟计算验证

模拟计算的目的是要验证: 1. (2)、(3)式的可靠性, 并与聚焦法原公式进行比较; 2. 逐次逼近计算方法的有效性。

模拟计算中, 取折射率分布为梯折透镜中常见的抛物线分布。

在验证(2)、(3)式的计算中, 中心与边界折射率差 Δn 分别取 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 以 δn 表示计算分布值与给定的分布值之差。

计算结果表明: (2)、(3)式的原公式的 δn 小两个数量级, 且原公式的 δn 值随折射率差 Δn 的增大而迅速增大, 只有当 $\Delta n < 0.02$ 时, 方可认为满足测量要求(此时 $\delta n < 1 \times 10^{-4}$), 而(2)、(3)式的 δn 值随 Δn 的增大变化不大, 很明显, (4)、(5)式的准确性要远好于原公式。

在验证逐次逼近法有效性的计算中, 取折射率差 $\Delta n = 0.02$, 边界折射率 $n_a = 1.5330$ 。

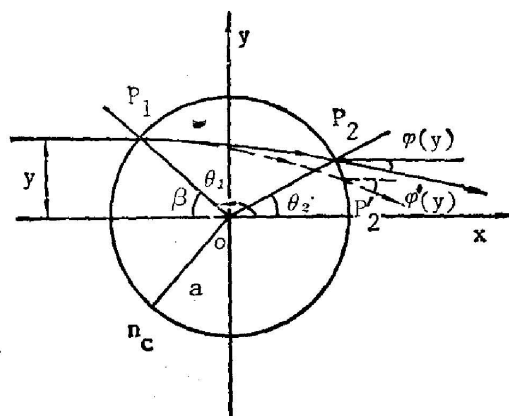


Fig. 1 Schematic of the geometry of focusing method

计算结果是: 当 $n_c - n_0 = 0.005$ 时, 计算出的边界值为 1.5326 , 与 1.5330 相差 4×10^{-4} , 而整个折射率分布中相差最大的地方为 3.8×10^{-4} , 最小为 0.98×10^{-4} , 平均相差 1.37×10^{-4} ; 当 $n_c < n_0$ 时, 如两者相差 2×10^{-3} 时, 边界计算值为 1.5330 , 与实际值相等, 整个折射率分布中相差最大的为 0.6×10^{-4} , 最小为 0.21×10^{-4} , 平均相差为 0.33×10^{-4} , 由此可见: 此方法较有效地消除 $n_c \neq n_0$ 时对测量的影响, 从而较好地再现原折射率分布。

二、测量系统误差估算

这里主要讨论匹配液折射率 n_c 的测量误差对最后结果的影响, 仍采用模拟计算的方法分析。

模拟计算中的条件同前, 只是取 $n_c - n_0 = 5 \times 10^{-3}$, 由于实际测量中匹配液的折射率值由阿贝折射仪测量, 故取 n_c 的测量误差为 $\delta n_c = \pm 3 \times 10^{-4}$ 。

计算结果表明: 当 $\delta n_c = \pm 3 \times 10^{-4}$ 时, 其对应的计算误差 $\delta n(r)$ 也与 $\delta n_c = 0$ 时的 $\delta n(r)$ 相差约 $\pm 3 \times 10^{-4}$, 由此可见: δn_c 直接影响测量的精度, 要想提高测量精度, 无疑首先要提高 n_c 的测量精度。

此外, 观测面上光功率分布 $P(y)$ 的测量误差对偏转角的计算亦有一定影响, 特别是 $P(y)$ 的系统误差对结果影响较大, 故需在测量中采取办法加以消除, 以提高测量结果的精度。总起来讲, 整个系统的测量精度不难达到 10^{-4} 量级。

三、测量装置及结果

图 2 所示为测量装置框图, 利用它, 分别对光纤预制棒与玻璃梯度棒进行了测试。

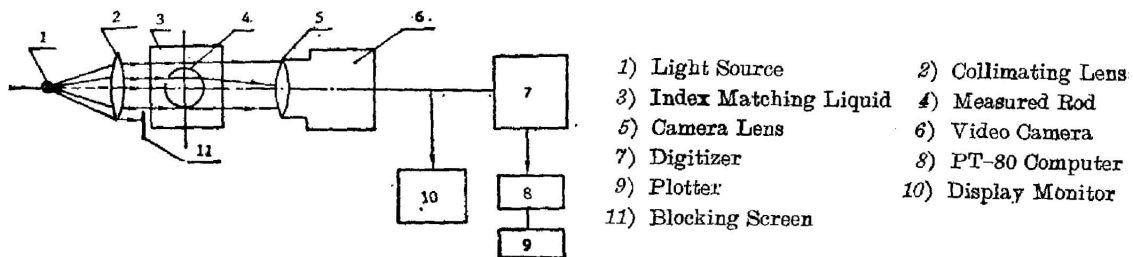


Fig. 2 Experimental arrangement of measuring the index profile by focusing method

对预制棒的测量结果见图 3, 其中图 3(a) 为本文测量结果, 图中只画出了直径上分布的一半, 图 3(b) 为英国 "Plol Preform Analyser" 测量仪对同一棒的测量结果, 该仪器的测量精度为 5×10^{-4} , 两图中均将棒的半径规范化为 1。从图 3 的两条曲线可以看出: 两者的分布形状相当一致, 就折射率差而言, 本文所测值约为 0.0145 , 英国测量仪测量结果为 0.015 , 两者相差约 5×10^{-4} 。

图 4 为梯度棒的测量结果, 其中虚线为本文测量结果, 实线为切片干涉法测量结果, 从图中可以看到两条曲线能较好地吻合, 所测出的折射率差 Δn , 两者几乎相等。

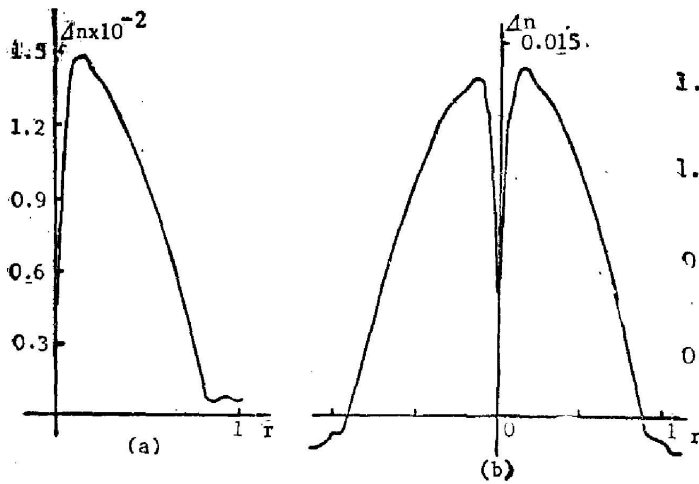


Fig. 3 Measured results of preform

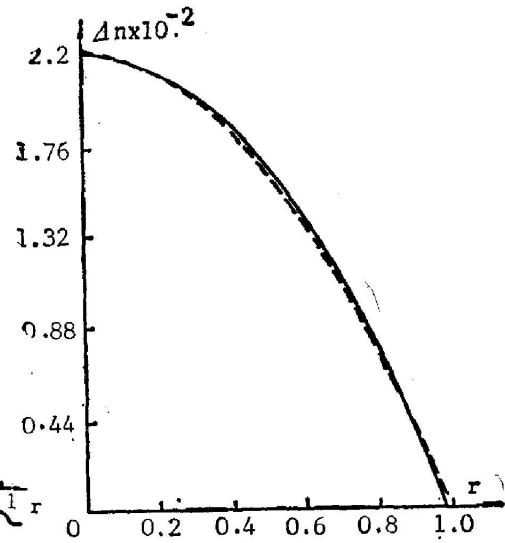


Fig. 4 Measured results of gradient index rod

四、结 论

尽管本文所进行的实验仅仅是初步的,但从本文的原理分析及初步实验可见:通过本文对原聚焦法的改进,使得这一方法可以用在梯折透镜的折射率分布测量中,与现有的测量方法(如干涉法)相比,它不失为一种装置简单,测量迅速可靠的非破坏性的测量方法。

参 考 文 献

- [1] D. Marcuse; *Appl. Opt.*, 1979, 18, No. 1 (Jan) 9~13.
- [2] D. Marcuse and H. M. Presby; *Appl. Opt.*, 1979, 18, No. 1 (Jan), 14~22.
- [3] H. M. Presby and D. Marcuse; *Appl. Opt.*, 1979, 18, No. 5 (Mar), 671~677.
- [4] D. T. Moore; *Appl. Opt.*, 1980, 19, No. 7 (Apr), 1035~1038.
- [5] J. L. Coutaz and P. C. Jaussand; *Appl. Opt.*, 1982, 21, No. 6 (Mar), 1063~1065.
- [6] A. M. Hunter and P. W. Schreiber; *Appl. Opt.*, 1975, 14, No. 3 (Mar), 635~639.

Focusing method for measurement of refractive-index profiles in gradient-index lens

PENG HANJUN, ZHU QIUDONG AND SU DATU

(Department of Engineering Optics, Beijing University of Science & Technology)

(Received 28 March 1988; revised 17 July 1989)

Abstract

In this paper, according to the differences of the index profiles between gradient-index lens and fiber, the focusing method, which was applied successfully in the measurement of fiber and its preform, has been greatly improved on the principle formula and calculating method, in order that the focusing method can be suitable to the measurement of gradient lens. The reliability of the modified focusing method was tested by computer simulation and the error of measurement was given in same way. Finally the index profiles of some samples were measured and compared with the results by other method or instrument.

Key words: refractive-index measurement; gradient-index lens.