

聚焦法测量梯度透镜剖面 折射率分布的讨论

彭汉俊 朱秋东 苏大图

(北京工业学院)

摘要: 聚焦法能较好地用梯度透镜剖面折射率分布的测量中是一种装置简单测量迅速的测试方法。

一、引 言

迅速而又准确地测量梯度透镜剖面折射率的分布一直是人们关注的问题。本文将讨论用聚焦法实现对梯度折射率的测量。

聚焦法^[1]是一种通过测量一束垂直于剖面中心轴入射的平行光经在剖面内传播后的出射偏转角,来计算剖面折射率分布的测量方法。这一方法已成功用在光纤及其预制棒的测量中^{[2]~[4]}。但由于光纤与梯度透镜的用途及制造方法的不同,二者的折射率分布结构有很大差别。为了实现聚焦法对梯度透镜的测量,本文针对梯度透镜折射率分布的特点,导出了可适用于大折射率差的准确的原理计算公式,在计算方法上采用逐次逼近的方法以解决折射率匹配液与被测件剖面边界折射率难以准确匹配的问题,在测量中取三个观测面以消除入射光场不均匀的影响。

二、测量原理及方法的讨论

1. 原理公式的讨论

聚焦法是D. Marcuse于1979年提出的,其原理计算公式是:

$$n(r) = n_s - \frac{n_s}{\pi L} \int_r^0 \frac{y - y_1(y)}{(y^2 - r^2)^{1/2}} dy \quad (1)$$

式中各符号的意义如图1所示。

此计算公式是在下述两个假设条件下推出的。即:(1)折射率分布为圆对称分布;(2)剖面中心折射率与边缘折射率之差 Δn 要很小(一般要求小于0.02)。由于这第二个假设条件使得公式(1)本身存在一定的原理误差,因此它仅适用于 Δn 很小的情况,这点在后面的计算机模拟计算的结果中将会看到。

为了消除公式(1)中存在的原理误差,我们将假定条件(2)取消,而根据光线在剖面内的传播规律而导出新的准确计算公式。

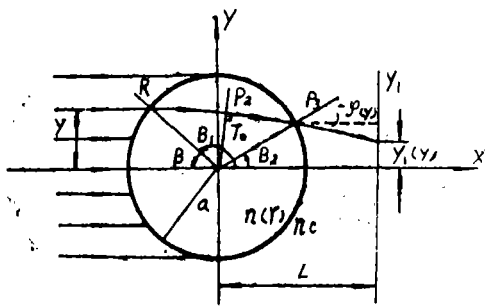


图1 聚焦法原理光路图

如图1, $\widehat{p_1 p_2}$ 为入射高是 y 的光线在剖面内的传播轨迹, 此光线的出射偏转角为 $\varphi(y)$, 同时要求匹配液折射率 n_c 等于剖面边缘折射率 n_a 。这样从图中几何关系可知:

$$\varphi(y)/2 = \pi/2 - [\beta + (\theta_1 - \theta_2)/2] \quad (2)$$

根据光线在此时的折射率分布情况下的传播规律^[5]:

$$d\theta/dr = \pm n_c y / r (n_c^2 \cdot r^2 - n_c^2 y^2)^{1/2} \quad (3)$$

经数学整理及变换, 便可得到折射率 $n_{(r)}$ 的准确计算公式:

$$\begin{cases} n_{(r)} = n_a \exp\left(-\frac{1}{\pi} \int_r^a \frac{\varphi(y)}{(y^2 - r'^2)^{1/2}} dy\right) & (4) \\ r = \frac{n_c}{n_{(r)}} \cdot r' & (5) \end{cases}$$

此公式组便是本文将采用的计算剖面折射率分布的公式。

为了将重新导出的公式(4)、(5)与原公式(1)进行比较, 说明各自再现折射率的准确性, 我们进行了模拟计算分析。计算结果见图二。计算中取折射率分布为

$$n_{(r)} = n_0 \left(1 - \frac{\Delta n}{n_0} \frac{r^2}{a^2}\right), \text{ 边界折射率 } n_a = 1.5163, \text{ 中心折射率 } n_0 = n_a + \Delta n, \text{ 剖面半径 } a = 1,$$

折射率差 $\Delta n = 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05$, 图中 δn 为再现折射率与给定折射率之差, 即 $\delta n = n_{(r)} - n_{(r)}$, 其中实线为公式(1)计算结果, 虚线为公式(4)、(5)计算结果。由于坐标单位的关系, 虚线仅画了 $\Delta n = 0.05$ 的情况, $\Delta n < 0.05$ 的再现误差 δn 均小于 $\Delta n = 0.05$ 的情况。

从图中计算结果可见, 公式(4)的计算误差远小于公式(1)的计算误差(约小两个数量级), 且公式(1)的计算误差随折射率差 Δn 的增大迅速增大, 而只有当 $\Delta n < 0.02$ 时方可满足测量的要求。而公式(4)的计算误差随 Δn 的增大变化不大。很明显, 公式(4)的准确性要好于公式(1)。

2. 匹配液折射率的考虑

在原理计算公式中的光线偏转角 $\varphi(y)$ 要求必须仅仅是由于剖面的折射率分布不均匀引起的, 所以要求匹配液折射率 n_c 等于剖面边缘折射率 n_a , 否则光线将在边界发生折射。所测出的偏转角将含有由于边界折射所引入的角度。这种情况如图3所示。

图中为匹配液折射率 n_c 小于边界折射率 n_a 时的情况。光线将分别在入射点 p_1 点与出射点 p_2 点处发生折射。图中两坐标系 $x'o'y'$ 和 xoy 中的 ox' 轴与 ox 轴分别与 p_1 点处的入射光与折射光平行, 光线经剖面传播出射后偏离 ox' 轴的角度为 $\varphi'(y')$, 在 p_2 点处的入射光线偏离 ox 轴的角度为 $\varphi(y)$, 显然测量的值 $\varphi'(y')$ 与公式中要求的 $\varphi(y)$ 二者并不相等, 根据图中几何关系及折射定律, 可知它们有下述关系:

$$\begin{cases} \varphi(y) = \varphi'(y') - 2[\sin^{-1}(y'/a) - \sin^{-1}(n_c y'/n_a \cdot a)] & (6) \\ y = n_c y'/n_a & (7) \end{cases}$$

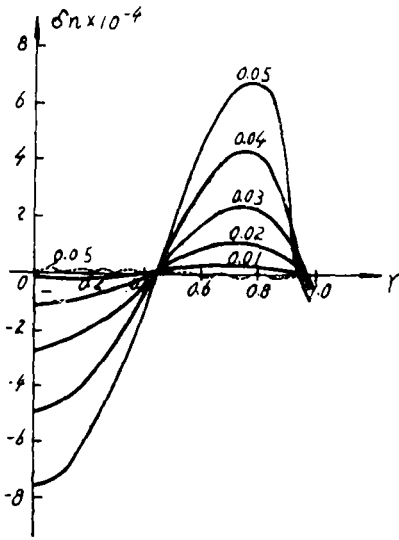


图2 模拟计算误差结果曲线

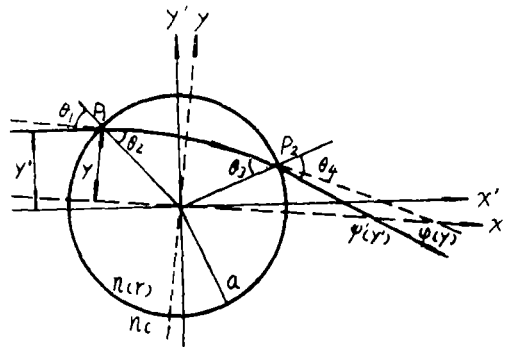


图3 $n_a \approx n_c$ 时, 光线传播轨迹示意图

两式中各符号的意义如图3所示, 从式中可以看到: 当 $n_c = n_a$ 时, $\varphi(y) = \varphi'(y')$ 。

可是, 在实际测量中往往很难做到这点, 特别对梯度透镜几乎不可能, 因为其剖面边界折射率一般是未知的, 即便是对于边界折射率已知的光纤, 要做到这点也是件困难之事。为此本文根据公式(6)通过对测量的角度 $\varphi'(y')$ 进行修正, 来得到原理公式中所要求的量 $\varphi(y)$, 这样便可允许 $n_a \approx n_c$, 从而大大降低匹配液准确匹配的要求, 这对实际测量很有意义。而且用于光纤测量也不复杂, 只要将测量的偏转角 $\varphi'(y')$, 匹配液折射率 n_c , 剖面边界折射率 n_a 代入到公式(6)、(7)中, 便得到了所需要的偏转角 $\varphi(y)$ 。但对于梯度透镜, 则不象光纤那样简单, 因为其边界折射率 n_a 未知。为解决对梯度透镜的测量, 本文提出用逐次逼近的计算方法实现对 $\varphi'(y')$ 的修正。

逐次逼近的计算方法是先将匹配液折射率 n_c 及光线偏转角的测量值 $\varphi'(y')$ 代入到折射率的计算公式(4)中计算。以后每次都以前次计算出的边界折射率值及按此值修正的偏转角代入公式(4)中逐次进行计算, 这样每计算一次, 其边界折射率便向实际值靠近一步, 如此反复进行, 直至前后两次计算的边界值相差很小时, 便认为最后计算出的折射率分布结果为所测的剖面折射率分布。

同样, 用模拟计算的方法对逐次逼近计算方法的有效性进行了验证。计算结果见表1,

表1

Δn_p		0.005	0.002	0	-0.002	-0.005
$e \times 10^{-4}$	最大值	-3.8	-3.8	-1.4	-0.8	-20.24
	最小值	-0.98	-1.18	-0.1	-0.21	-5.42
	平均值	-1.37	-1.57	-0.22	-0.33	-8.5
计算边界值		1.5326	1.5325	1.5330	1.5330	1.5333

结果表明：当匹配液折射率高于边界折射率值时，用此方法能有效地消除不匹配的影响，如折射液的值比边界折射率值大0.005时，计算出边界值为1.5326，与其真正的边界值仅差 4×10^{-4} ，而由此对整个折射率分布的影响最大 (3.8×10^{-4}) 。当匹配液折射率值小于边界折射率值，只要二者相差不大（如表中小于 2×10^{-3} ）时，也能很好地进行计算。由此可见，逐次逼近的计算方法可以有效地减小由于匹配液与棒边缘折射率不等时所带来的影响。

表中计算条件：

$$n_{理}(r) = n_0 \left(1 - \frac{\Delta n}{n_0} \frac{r^2}{a^2} \right)$$

$$\Delta n_s = n_c - n_a$$

$$\varepsilon = n_{计} - n_{理}$$

$$\Delta n = 0.02; \quad n_a = n_0 - \Delta n = 1.5330; \quad a = 1$$

3. 偏转角 $\varphi(y)$ 的测量方法

对于偏转角 $\varphi(y)$ 的测量方法，聚焦法在光纤的测量中是根据公式：

$$\operatorname{tg} \varphi(y) \approx (y - y_1(y)) / L \quad (8)$$

$$y = \int_0^{y_1} p_1(y_1) dy_1 \quad (9)$$

式中各量如图4所示，其中 $p_1(y_1)$ 为观测面 M_1 上的光功率分布。

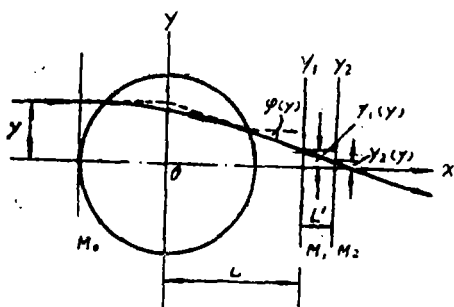


图4 偏转角测量方法示意图

$$\operatorname{tg} \varphi(y) = (y_2(y) - y_1(y)) / L' \quad (10)$$

但上述这两种方法都认为入射光场是均匀分布，考虑到入射光场不容易做到均匀分布，我们又再测出了入射光场 M_0 的分布 $p_0(y)$ ，并根据下列关系：

$$\int_0^y p_0(y) dy = \int_0^{y_1(y)} p_1(y_1) dy_1 \quad (11)$$

$i = 1, 2$ ，找出对应的 $y_1(y)$ ， $y_2(y)$ ，再根据公式 (10) 式来得到出射光线偏转角。

根据上述原理公式及计算测量方法的分析，本文曾进行了初步实验，得到了较为满意的结果。

三、结 论

通过上述分析讨论，我们认为聚焦法能较好地用于梯度透镜剖面折射率分布的测量中，与现有的测量方法（如干涉法）相比，装置简单，测量迅速的测试方法。

参 考 文 献

- [1] D. Marcuse, Appl., Opt., 1979 18, No.1 p9
- [2] D. Marcuse and H. M. Presby, Appl., Opt., 1979.18, No.1 p 14
- [3] H. M. Presby and D. Marcuse, Appl., Opt., 1979.18, No.5 p 671
- [4] H. M. Presby, Appl., Opt., 1979, .18, p 4006
- [5] A. M. Hunter II and P. W. Schreiber, Appl., Opt., 1975.14, No.3 p 634

A Discussion About the Focussing Method Used to Measure the Refractive Index Profile of Gradient Lens

Peng Honjun Zhu Qiudong Su Datu

Abstract

The focussing method can well be used to measure the refractive index profile of gradient lens and equipment used is very simple and the measurement can be very quickly finished with this method.