

两种透明介质微小折射率差高精度测量的新方法

吴 婷, 邹 岩, 李之通, 惠勇凌, 李 强

(北京工业大学 激光工程研究院, 北京 100124)

摘要:对现有折射率的测量技术进行分析,提出了一种测量两种透明介质间微小折射率差的新方法。首先,介绍了微小折射率差干涉测量方法的原理,并对该测量原理利用 Zemax 光学仿真软件进行了理论模拟论证。该实验中首先,采用热键合技术制备包含两种被测量材料的组合平板;其次,利用干涉测量仪及外光路测量样件界面区域不同入射角下的光程差;再者,利用几何光学中的折射定律,推导折射率分布与干涉光程差的关系式。最后,通过二次曲线拟合获得正入射时的光程差微小变化值、换算得到样件两种材料的折射率差值。实验测量了 1 at.%Yb³⁺:YAG 晶体与 YAG 晶体的热键合样品的折射率差,测量值为 5.41×10^{-5} ,测量系统精度 10^{-7} 量级。结果表明:该测量方法原理简单、操作简便,测量精度高。

关键词: 光学测量; 折射率差; 干涉法; 透明介质

中图分类号: TN247 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0417005

Novel approach for high-precision measurement of micro refractive index difference of two transparent mediums

Wu Ting, Zou Yan, Li Zhitong, Hui Yongling, Li Qiang

(Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: A novel method to measure the refractive index distribution of two transparent mediums was proposed in this paper after analyzing measure methods of refractive indexes in existence. The basic principle and interferometry method of the measurement of micro refractive index change between two transparent mediums were described, and the theoretical feasibility of this measurement method was studied by using Zemax optical simulation software. Firstly, in this experiment, a composite plate from two transparent mediums to be measured was prepared by adhere-free bonding technology. Secondly, the optical path difference caused by the refractive index difference in the bonding interface was measured with the help of interferometer, under the different splitting angles of the composite plate. And then, the relational expression between the refractive index distribution and the optical path difference was deduced by using the law of refraction in geometrical optics. At last, the micro difference value of the optical path difference for normal incidence was obtained by conic approach technique in dealing with measuring data, and thus the final result of refractive index difference between two transparent mediums was obtained according to the conversion expression. The measured value of refractive index difference of a 1 at. % Yb³⁺: YAG/YAG bonded sample was also gotten and the value was 5.41×10^{-5} , thus the accuracy

收稿日期:2016-08-05; 修订日期:2016-09-15

基金项目:国家自然科学基金(61378023)

作者简介:吴婷(1990-),女,硕士生,主要从事高功率固体激光器方面的研究。Email:wuting@bjut.edu.cn

导师简介:李强(1965-),男,教授,博士,主要从事高功率固体激光器方面的研究。Email:ncltq@bjut.edu.cn

of measurement system was up to 10^{-7} magnitude. The experiment result shows that the measurement method is simple, easy operation and has high precision.

Key words: optical measurement; refractive index difference; interferometry; transparent materials

0 引言

折射率作为光学材料,尤其是晶体、玻璃等固态透明介质的重要光学参数,是研究其他光学性质和应用的基础。其中,两种光学材料微小折射率差的测量,对梯度分布折射率材料的特性研究和制作工艺有极重要的作用。例如,在光纤、光波导、半导体器件等的设计以及制备过程中,折射率分布和均匀性是其主要性能指标。光纤和光波导的折射率分布直接确定了模场直径、波导耦合系数、远场光强分布特性、色散特性等重要参数及特性^[1-2],尤其是在单模光纤和波导的尺寸设计中^[3],包层间折射率差值必须先测定。

两种光学材料折射率差的测量,分为直接测量和间接测量,直接测量是指通过一个步骤测量出两种光学材料折射率差值;而间接测量是分别测量两种光学材料折射率再求出差值。

对两种光学材料微小折射率差的测量,如折射率差在 10^{-6} 量级,直接测量只需测量系统测量精度在此量级,便可满足测量需要;而间接测量需要测量系统测量精度在 10^{-7} 量级,才能满足测量需要。因此,对两种光学材料微小折射率差的测量,直接测量方法对测量系统测量精度的要求相对较低。

分析现有对于两种固体光学材料折射率差的间接测量方法,即折射率的测量方法。常规的测量方法,如光谱法^[4]、自准直法、临界角法、衍射光栅干涉法^[5]的测量精度为 10^{-4} 量级;光栅莫尔条纹法^[4]的精度为 10^{-5} 量级,且有精确测量平板厚度(精度要求 $0.1 \mu\text{m}$)要求;最常用的是最小偏向角法^[6-7],这种传统的折射率测量方法精度为 $10^{-5}\sim 10^{-6}$ 量级,且对测量样品的尺寸和形状有特殊要求,测量过程较繁琐;干涉法^[5,8-9]测量精度在 10^{-6} 量级,且可以实现快速、自动化的测量。而现有的两种固体光学材料折射率差的直接测量方法,如折射近场技术^[10-11]、解析法^[12]、远场法^[13]、聚焦法^[14]、反射法^[15]、扫描法^[16]和双、多光路干涉法^[17-19]等方法,测量精度在 10^{-4} 量级。目前,对两种光学材料微小折射率差的测量,如折射率差测量精度在 10^{-6} 量级,无论是直接测量方法,还是

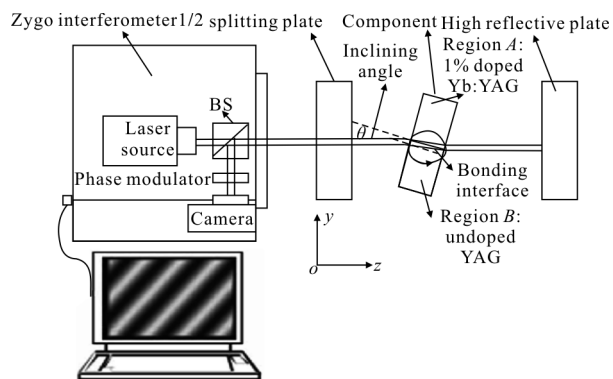
间接测量,都不能满足在实际应用需要。

为满足实际测量应用需要,文中提出了一种对折射率差值的高精度直接测量方法,即折射率差测量精度在 10^{-6} 量级测量方法。介绍了微小折射率差干涉测量方法的原理,使用普通的 Zygo 激光干涉仪测量两种透明介质间的折射率差,分析了测量系统的测量精度,测量了掺杂浓度 1at.% Yb³⁺:YAG/YAG 无胶键合晶体的折射率差值,测量精度为 10^{-7} 量级。

1 微小折射率差测量方法

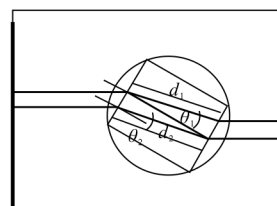
1.1 测量原理及分析

测量微小折射率差的原理见图 1。将待测的组合样品放在 1/2 分光平板和平面反射镜中间,调整反射



(a) 测量微小折射率变化原理示意图

(a) Principle diagram of measurement of the refractive index change



(b) 键合界面区域光路放大示意图

(b) Amplified diagram of optical path of bonding interface

图 1 实验结构示意图

Fig.1 Schematic drawing of the experiment

镜与 1/2 分光平板之间的距离,使反射镜反射回来的光束与 1/2 分光平板反射回的光束在干涉仪中发生干涉,产生等厚干涉条纹,干涉仪输出干涉图像和表征光程差变化量(ΔOPD)大小的峰谷(peak to valley, PV)

值。假如被测样品上由两种折射率不同的晶体构成,如图 1 中的区域 A 和 B,两种晶界面无胶键合、通光方向上等厚。当干涉仪中作为光源的激光器发出的平行光入射到被测样品时,被测样品的界面由于折射率的差异,将出现干涉条纹的突变;而其他部分,即区域 A 和 B 部分,则出现各自同光程的干涉条纹。干涉仪输出被测样品的干涉图、以及被测区域的 PV 值。根据 PV 值,可获被测样品键合界面处的 ΔOPD 值,在等厚的条件下,可获该样品折射率差值。

折射率差值的测量精度,主要由干涉仪的平面测量精度确定,而干涉仪(如 Zygo 干涉仪)测量光程差的平面精度很高(如 $\lambda/100$),此折射率差值的测量方法从原理上精度较高。测量中,如被测样品表面与干涉仪发出的平行入射光垂直,即入射光的入射角为 0° ,干涉仪输出被测样品的 ΔOPD 值表示为 $\Delta OPD(0)$,若被测样品的厚度为 t ,则可获得被测样品两种晶体键合界面的折射率差值:

$$\Delta OPD(0)=2\Delta n \times t \quad (1)$$

但实际测量中,当样品 0° 倾斜时,由于被测样品界面之间(图 1 中区域 A 和区域 B 之间)折射率差很小,干涉条纹在如此小的过渡区内变化不明显,几乎交叠在了一起,OPD 值变化不连续,光程差值很难直接精确测量。为了找到解决上述问题的方法,笔者采用 Zemax 软件对测量原理进行了模拟。笔者从玻璃库中选用了 BK7 和 K3 两种不同折射率材料用于模拟,假定两种材料界面键合,通光方向厚度相同。图 2 是在 Zemax 软件中建立的测量折射率变化的系

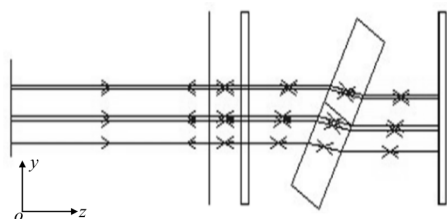
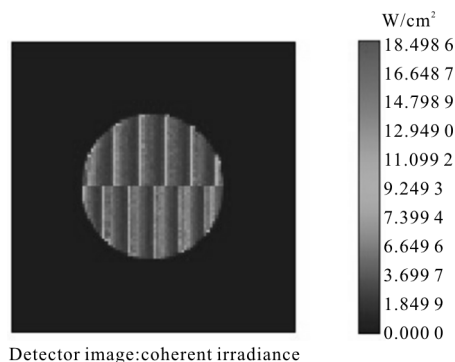


图 2 干涉法测量折射率变化的系统光路图

Fig.2 Zemax simulation layout of interferometry measuring system

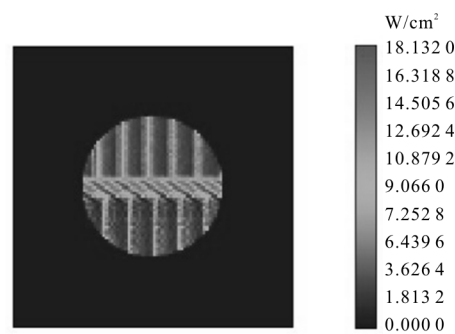
统光路图。模拟出的组合样件的干涉图样,包括模拟出的被测样品倾斜角为 0° 和 30° 时的干涉图样,如图 3 所示。样品 0° 倾斜时,干涉条纹在两样品界面变化不连续,而样品 30° 倾斜时,干涉条纹在两样品界面变化是连续的,可精确直接测量光程差值。



Detector image:coherent irradiance

(a) 倾斜 0° 时干涉图样

(a) Interference fringes at 0° inclining angle



Detector image:coherent irradiance

(b) 倾斜 30° 时干涉图样

(b) Interference fringes at 30° inclining angle

图 3 模拟实验干涉图样

Fig.3 Interference patterns of simulation experiment

若将被测样品倾斜一定角度(即以 θ 角入射样品表面),则可测量 $\Delta OPD(\theta)$ 。下面分析由 $\Delta OPD(\theta)$ 求出被测样品折射率差的计算公式。

1.2 折射率差的计算

首先,笔者定义 d_1, d_1 ,分别表示平行光束在 A、B 区域传播的物理长度(见图 1(b)):

$$d_1=t/\cos(\theta_1)=t/\cos(\sin^{-1}(\sin\theta/n_1)) \quad (2)$$

$$d_2=t/\cos(\theta_2)=t/\cos(\sin^{-1}(\sin\theta/n_2)) \quad (3)$$

式中: t 是组合平板厚度; θ 是光线入射角; θ_1, θ_2 是光线分别在 A、B 区域内的折射角; n_1 是掺杂部分折射率; n_2 是未掺杂部分折射率,不妨假设 $n_1 > n_2$,则 A、B 区域的光程表达式分别如公式(4)、(5)所示:

$$OPD_1(\theta)=2L-2\cos(\theta-\theta_1)d_1+2n_1d_1 \quad (4)$$

$$OPD_2(\theta)=2L-2\cos(\theta-\theta_2)d_2+2n_2d_2 \quad (5)$$

式中: L 为干涉仪腔长,等于参考平面与全反射面之间的距离。因此,将公式(4)、(5)得光束分别在 A、B 区域内传播的光程之差为:

$$\Delta OPD(\theta) = 2(n_1 d_1 - n_2 d_2) - 2 \sin \theta \sin \theta_1 d_1 + 2 \sin \theta \sin \theta_2 d_2 \quad (6)$$

又因为满足折射定律:

$$\sin \theta = n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2) \quad (7)$$

所以,再将公式(6)代入公式(7),该光程差表达式可化成:

$$\Delta OPD(\theta) = 2n_1 d_1 - 2n_2 d_2 - 2n_1 d_1 \sin^2 \theta_1 + 2n_2 d_2 \sin^2 \theta_2 \quad (8)$$

将公式(8)化简可得:

$$\Delta OPD(\theta) = 2n_1 d_1 - 2n_2 d_2 - 2n_1 d_1 (1 - \cos^2 \theta_1) + 2n_2 d_2 (1 - \cos^2 \theta_2) =$$

$$n_1 d_1 \cos^2 \theta_1 - n_2 d_2 \cos^2 \theta_2 =$$

$$2t(n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2) =$$

$$2t \left(n_1 \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta_1}{n_1^2}} - n_2 \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta_1}{n_2^2}} \right) \approx$$

$$2t \left(n_1 \left(1 - \frac{\sin^2 \theta}{2n_1^2} \right) - n_2 \left(1 - \frac{\sin^2 \theta}{2n_2^2} \right) \right) =$$

$$2(n_1 - n_2) \times t + (n_1 - n_2) \times t \times \frac{\sin^2 \theta}{n_1 n_2}$$

当 $\theta=0^\circ$ 时,

$$\Delta OPD(0) = 2(n_1 - n_2) \times t \quad (9)$$

表示组合样件未倾斜时的干涉场光程差。所以当样品旋转 θ 角时,光程差也可表示为:

$$\Delta OPD(\theta) = \Delta OPD(0) + \Delta n \times t \frac{\sin^2 \theta}{n_1 n_2} \quad (10)$$

当 $0 \leq |\theta| \leq 1$ 时,可以做近似: $\sin \theta \approx (\theta)$ 。于是,最终可以得到 $\Delta OPD(\theta)$ 的近似计算表达式为:

$$\Delta OPD(\theta) \approx \Delta OPD(0) + \Delta n \times t \frac{\theta^2}{n_1 n_2} \quad (11)$$

由公式(11)可知, $\Delta OPD(\theta)$ 是一条关于 θ 的开口向上的二次函数。利用 Zygo 干涉仪可以测出不同旋转角 θ 下分界面处的光程分布 PV 值,即光程差 $\Delta OPD(\theta)$ 的大小,再拟合 $\Delta OPD(\theta) - \theta$ 函数变化的二次曲线。又根据公式(10)可知,拟合曲线横轴零坐标对应的纵坐标值就是正入射时热键合界面处的光程差值,即 $\Delta OPD(0)$ 。这样就可以根据计算公式(9),最终得到两种透明介质的折射率差值。

2 实验结果及分析

实验采用 Zygo 干涉仪测量光程差 $\Delta OPD(\theta)$ 。实验测量样件是 1at.% Yb³⁺:YAG/YAG 组合件,晶体 Yb³⁺:YAG 与 YAG 间采用无胶键合,并经高温处理,两测量表面经光学抛光加工,平面测量精度约为 $\lambda/10$,厚度 $t=4.161 \text{ mm} \pm 0.001 \text{ mm}$,组合样件实物如

图 4 所示,测量样件由该实验室制备。

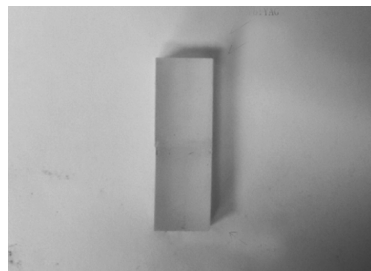


图 4 厚度 $t=4.161 \text{ mm}$ 的测试组合平板图

Fig.4 Image of tested composite plate with thickness of 4.161 mm

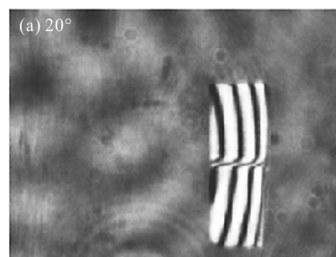
改变样件不同倾斜角,测量样品界面区域的 PV 值。测量角度分别为 $20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ, -20^\circ, -30^\circ, -40^\circ, -50^\circ$,测量值列于表 1。需要说明的是,由于样件两表面的面形和平行度远低于干涉仪测量光程的精度 ($\lambda/100$),因此对每一测量数据,需采用外插值补偿样

表 1 $\Delta OPD(\theta)$ 测量结果

Tab.1 Measured values of $\Delta OPD(\theta)$

Inclining angle $\theta/(^\circ)$	-50	-40	-30	-20	20	30	40	50
$\Delta OPD/\text{nm}$	520.5	490.7	472.2	465.3	463.0	473.7	498.9	520.0

件两表面的面形和平行度误差带来的 OPD 偏差,即将被测样品视为具有微小坡度的楔板(不平行度小于 $1'$),由于实验用样品键合区厚度不大 ($=4.161 \text{ mm}$),该区域在 y 轴上的投影很短 ($<3.6 \text{ mm}$),此时的折射率可以认为近似不变。因此,由该微小坡度引起的键合界面处不同位置的最大 OPD 偏差可以近似等于厚度差与该区域折射率的乘积。最终将干涉仪直接输出的 $\Delta OPD(\theta)$ 值加上该外插补偿值。实验证明该方法可以获得较为精确的最终测量值。样品界面区域部分干涉图样如图 5 所示。利用测量获得的 $\Delta OPD(\theta)$ 值,画出 $\theta - \Delta OPD$ 关系并给出拟合曲线,如图 6 所示。从拟合曲线 $\theta=0$ 处,获得 $\Delta OPD(0)=$



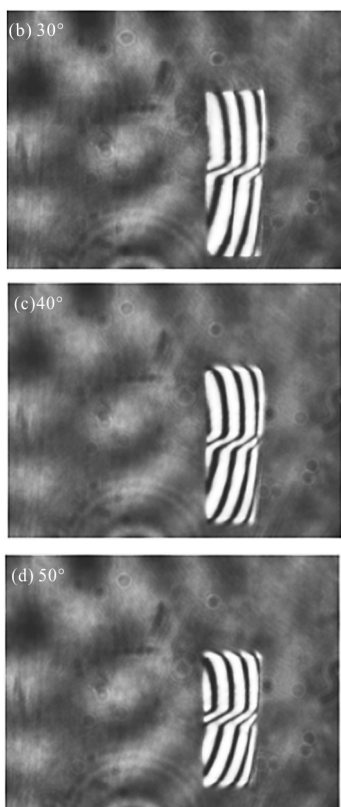


图 5 组合平板不同倾角下波前干涉图样

Fig.5 Wave-front interference patterns of composite plate

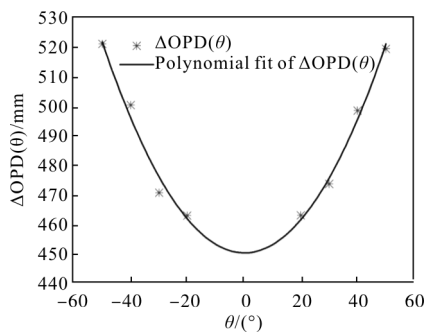


图 6 $\theta-\Delta\text{OPD}(\theta)$ 关系曲线图

Fig.6 Graph of $\theta-\Delta\text{OPD}(\theta)$ relation curve

450.1 nm。由公式(7)得到该组合样件的折射率差值为 5.41×10^{-5} 。

根据误差理论的相关知识,由公式(11)可得折射率差测量的系统误差计算公式为:

$$\varepsilon(\Delta n) = \varepsilon(\Delta\text{OPD})/2t + (\Delta\text{OPD} * \varepsilon(t))/2t^2 \quad (12)$$

式中: $\varepsilon(\Delta\text{OPD})$ 为 ΔOPD 在实验中的测量误差; $\varepsilon(t)$ 为样品厚度 t 在实验中的测量误差。实验中,数显卡尺的测量精度为 $1 \mu\text{m}$,笔者所用的 Zygo 干涉仪的平面测量精度为 $\lambda/100=6.328 \text{ nm}$ 。因此,根据上面误差计算公式之中的第一项,由厚度 t 测量误差引起

的 Δn 测量误差大约在 10^{-8} 量级;第二项,由光程差测量误差贡献的 Δn 测量误差大约为 8×10^{-7} 。最终实验测量的最高精度为 8×10^{-7} 。

3 结论

实验中,笔者利用 $\lambda=632.8 \text{ nm}$ 的 Zygo 激光干涉仪测量得出了掺杂浓度为 1% 的 $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$ 与未掺杂的 YAG 之间的折射率差为 5.41×10^{-5} ,系统测量精度在 8×10^{-7} 量级。这种测试方法适用于各种可键合的透明介质,但对组合样件的厚度均匀性有较高要求,测试设备和操作都比较简单,可以得到较高的精度。

参考文献:

- [1] Mu Xiaodong, Stephanie Meissner, Helmuth Meissner, et al. High efficiency Yb: YAG crystalline fiber-waveguide lasers [J]. *Optics Letters*, 2001, 39(21): 6331-6333.
- [2] Mu Xiaodong, Helmuth Meissner, Huai-Chuan Lee. True crystalline fibers: double-clad LMA design concept of Tm: YAG-Core fiber and mode simulation [C]//SPIE, 2012, 8237: 8237M-1-5.
- [3] Liao Suying, Gong Mali. New progress of large mode area fiber[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011,40(3): 455-462. (in Chinese)
廖素英, 巩马理. 大模场光纤研究的新进展 [J]. 红外与激光工程, 2011, 40(3): 455-462.
- [4] Bhattacharya J C. Measurement of the refractive index using the Talbot effect and moire techniques [J]. *Applied Optics*, 1989, 28(13): 2600-2604.
- [5] Yeh Y, Yen Liang. Simultaneous measurement of refractive index and thickness of birefringent wave plates [J]. *Appl Opt*, 2008, 47(10): 1457-1464.
- [6] Dalmon M, Masumura A. High accuracy measurement of the refractive index and its temperature coefficient of calcium fluoride in a wide wavelength range from 138 to 2326 [J]. *Applied Optics*, 2002, 41(25): 5275-5281.
- [7] Burnett J H, Gupta R, Griesmann U. Absolute refractive indices and thermal coefficient of CaF_2 , SrF_2 , BaF_2 , and LiF near 157 nm [J]. *Appl Opt*, 2002, 41(13): 2508-2513.
- [8] Galli M, Marabelli F, Guizzetti G. Direct measurement of refractive-index dispersion of transparent media by white-light interferometry [J]. *Appl Opt*, 2003, 42(19): 3010-3914.
- [9] Yasuaki Hori, Akiko Hirai, Kaoru Minoshima, et al. High-accuracy interferometer with a prism pair for measurement of

- the absolute refractive index of glass [J]. *Applied Optics*, 2009, 48(11): 2045–2049.
- [10] White K I. Practical application of the refracted near-field technique for the measurement of optical fiber refractive index profile [J]. *Opt & Quantum Electron*, 1976, 11(4): 669–671.
- [11] Morishita K. Index profiling of three-dimensional optical waveguides by the propagation-mode near-field method [J]. *Light Wave Technology*, 1986, 4(8): 1120–1124.
- [12] Pogossian S P. A new approach to determining the waveguide mode index distribution [J]. *Opt & Quantum*, 1993, 25(2): 417–422.
- [13] Vladimir A B, Anton V B, Denis E P. Direct method determination of the equivalent refractive index profile of the multimode optical fiber by measured impulse responses due to scanning output fiber end [C]//SPIE, 2015, 9533: 95330W–1.
- [14] Marcuse D. Refractive index determination by the focusing method [J]. *Appl Opt*, 1979, 18(1): 9–13.
- [15] Ikeda M, Tateda M, Yoshikiyo H. Refractive index profile of a graded index fiber, measurement by a reflection method [J]. *Applied Optics*, 1975, 14(4): 814–815.
- [16] Zhou Hongying, Chen Jiabi, Hu Qunhua, et al. Investigation of scan to measure the distributing of refraction ratio of section plane [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(S1): 159–161.(in Chinese)
周鸿颖, 陈家璧, 胡群华, 等. 利用扫描法测量预制棒折射率[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(S1): 159–161.
- [17] Hamza A A, Mabrouk M A. Determination of GR-IN optical fiber parameters from transverse interferograms considering the refraction of incident ray by the fiber [J]. *Optical Communications*, 2001, 200(1–6): 131–138.
- [18] Yan X, Liu L. Determining the optical properties of highly oriented fibers using a multiple-beam technique [J]. *Journal of Optics A: Pure Applied Optics*, 2001, 3(5): 421–427.
- [19] Hamza A A, Sokkar T Z N, Ghander A M, et al. On the determination of the refractive index of a fiber: II. graded index fibers [J]. *Pure Applied Optics*, 1995, 4: 161–177.