

平面光波导折射率分布的测定*

韦 珏 徐晓峰 耿和平 康智慧 姜 云 高锦岳**

(吉林大学物理学院, 相干光与原子分子光谱教育部重点实验室(筹), 长春 130023)

摘要 利用棱镜耦合原理与改进的反 WKB 理论, 实现了平面光波导折射率分布的测定. 通过该方法获得了离子交换玻璃波导折射率分布曲线, 该方法具有操作简单、测量准确的优点.

关键词 棱镜耦合; 平面波导; 折射率分布

中图分类号 TN252 **文献标识码** A

0 引言

平面光波导作为集成光路的基础, 它不仅是集成光学器件的重要组成部分, 其参量的表征还可以为条形波导的制作提供必要的参考. 而折射率分布是光波导最重要的参量, 对介质的特性和传输性能有极其重要的影响, 基于这种考虑, 本文利用棱镜耦合原理与反 WKB 理论, 进行了平面光波导折射率分布的测定. 与干涉显微镜法^[1]、近场法^[2]、空心阴极法^[3]等相比, 该方法具有操作简单、测量准确的优点.

在集成光学中, 光波导的制备方法包括溅射、溶胶-凝胶、离子交换等^[4-6]. 其中离子交换光波导以其传输损耗小, 制作成本低廉, 以及易于与其它光电元件集成等优点而极具应用前景. 离子交换波导的折射率是渐变的, 而变折射率光波导的测试更具有代表性, 因此我们在实验过程中选用离子交换玻璃波导作为测试对象进行表征.

1 实验原理

棱镜耦合技术用于测试波导导模的有效折射率, 是表征平面波导的常用方法之一, 它的工作原理如图 1^[7]. 一束光以入射角 θ_m 射入棱镜, 当入射光线在棱镜和波导间隙中沿 Z 方向上的相速度与波导中第 m ($m=0, 1, 2, \dots$) 个模式在 Z 方向上的相速度满足相位匹配条件时, m 阶模有效折射率的表达

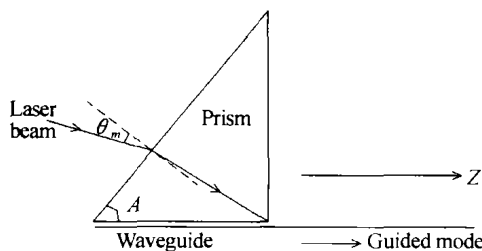


图 1 棱镜耦合原理图

Fig. 1 Principle of prism coupling

式为

$$N_m = n_p \sin \left[\arcsin \left(\frac{\sin \theta_m}{n_p} \right) + A \right] \quad (1)$$

式中, N_m 为第 m 阶模的有效折射率, n_p 为棱镜折射率, A 为棱镜的底角.

为了利用有效折射率确定折射率分布曲线 $n(x)$, White 等^[8] 最初提出了反 WKB 方法. 本文采用了改进的数据处理方法^[9,10]. 根据 WKB 法对非对称渐变折射率波导的分析, 模式本征方程可写作

$$\frac{2\pi}{\lambda} \int_0^{x_i(m)} (n^2(x) - N_m^2)^{1/2} dx = \Phi(N_m, n_c) + (m + 4^{-1})\pi \quad (2)$$

式中, $\Phi(N_m, n_c) = \arctan \left[r \left(\frac{N_m^2 - n_c^2}{n_0^2 - N_m^2} \right)^{1/2} \right]$, 在模的转向点 $x_i(m)$ 处 $n(x_i(m)) = N_m$, n_c 是波导和棱镜耦合间隙的折射率, n_0 为波导表面折射率, $r = 1$ (TE 模) 或 $r = (n_0/n_c)^2$ (TM 模), λ 是入射光波长. 通常情况下 n_c 取空气折射率 $n_a = 1$, 当波导模式较少时, 可选用不同的折射率匹配液滴加到波导和棱镜的耦合间隙进行有效折射率测量, 则数据处理过程中每个有效折射率所对应的模阶数 m 需要修正为

$\bar{m} = m - [\Phi(N_m, n_a) - \Phi(N_m, n_c)]/\pi$, 此时, N_m 就相当于式(2)中的 N_m .

要利用式(2)求 $n(x)$, 首先通过 Gregory-Newton 插值公式将 N_m (或 $N_{\bar{m}}$) 扩展成对任何实数均成立的函数 $N(m_i)$, 令 $N(m_i)$ 分别等于 n_0 及衬底折射率, 就可以很容易地求出相应的 m_i , 它们是 $-0.75, y$, 其中 y 视具体的波导而定. 然后在 $N(-0.75)$ 和 $N(y)$ 之间取 M 个数据点

$n_i = N(-0.75 + i(y + 0.75)/M)$ ($i = 1, 2, \dots, M$) 则式(2)左边可写成连续求和的形式

$$\frac{2\pi}{\lambda} [(\bar{n}_1^2 - n_i^2)^{1/2}(x_1 - x_0) + (\bar{n}_2^2 - n_i^2)^{1/2}(x_2 - x_1) + \dots + (\bar{n}_i^2 - n_i^2)^{1/2}(x_i - x_{i-1})] = \arctan \left[r \left(\frac{n_i^2 - 1}{n_0^2 - n_i^2} \right)^{1/2} \right] + (m_i + 4^{-1})\pi \quad (3)$$

式中, $\bar{n}_i = (n_i + n_{i-1})/2$, $x_0 = 0$, 如果令式(3)右边等

*国家自然科学基金(10334010)资助项目

** Tel: 0431-5650478 Email: jygaao@mail.jlu.edu.cn

收稿日期: 2004-03-09

于 $\alpha_i (i=1, 2, \dots, M)$, 整理式(3), x_i 的解为

$$x_i = \frac{\lambda \alpha_i - 2\pi \sum_{j=1}^{i-1} \{x_j [(\bar{n}_j^2 - n_i^2)^{1/2} - (\bar{n}_{j+1}^2 - n_i^2)^{1/2}]\}}{2\pi(\bar{n}_i^2 - n_i^2)^{1/2}} \quad (4)$$

折射率分布曲线 $n(x)$ 即可由求得的各点 (x_0, n_0) 、 (x_1, n_1) 、 \dots 、 (x_M, n_M) 确定。

2 实验及结果

有效折射率测量实验装置如图 2。激光器(波长 650 nm)、偏振器、准直分束筒和测角转盘用支架安装在导轨上,通过支架的定位、平移和锁紧螺钉,使这些部件可以旋转、升降和沿导轨平移。光波导样品与耦合棱镜由棱镜夹具压在一起并置于测角转盘的 x - y 平移台上。CCD 和零位探测器则分别安装在测角转盘及准直分束筒上的适当位置。

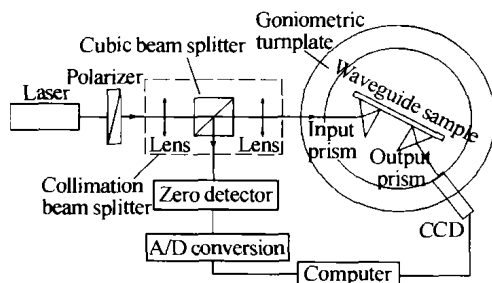


图 2 有效折射率测量实验装置图

Fig. 2 Experimental setup for measuring effective indices

仪器工作时,先调节测角转盘的 x - y 平移台,使输入耦合棱镜处于转盘中心。调整光路,确保激光

束通过偏振器和准直分束筒的中心并投射到棱镜底的适当的位置,做到耦合光斑位于直角棱镜底接近直角棱的压力点处且在同步角(出现 m 线或传输条纹时测角转盘的角度)范围内随测角转盘的转动基本保持不动。用棱镜夹具的螺钉调节夹具的压力,使耦合棱镜和光波导的耦合间隙保持适当程度,这时转动转盘至合适角度,在电脑显示器上就会出现 m 线,如图 3。在调出 m 线的基础上,相应的入射角可由测角转盘上投影测微器读出。由于测角仪测得的角度值是相对的,所以必须先确定零位角,即当入射光线与棱镜斜面垂直时棱镜所处位置的角度,然后依次测出导模被最大激励时棱镜所处位置的角度值,与零位角值作差即得入射角 θ_m 的实际值。



图 3 离子交换玻璃波导样品的 m 线图像

Fig. 3 Photograph of m lines of an ion-exchanged glass waveguide

待测离子交换玻璃波导样品的制备条件分别是 BK 7 玻璃在 360 °C 的 $\text{AgNO}_3/\text{NaNO}_3$ 熔液(摩尔比 1:18)中反应 3 小时(样品 a)以及 400 °C 的 KNO_3 熔液中反应 24 h(样品 b)。测得二者的有效折射率

表 1 有效折射率测量结果

样品	N_0	N_1	N_2	N_3	N_4	N_5	N_6	N_7
a	1.563305	1.555653	1.548591	1.541697	1.534682	1.527477	1.520351	1.515034
b	1.521364	1.519130	1.517687	1.516629	1.515793	1.515133		

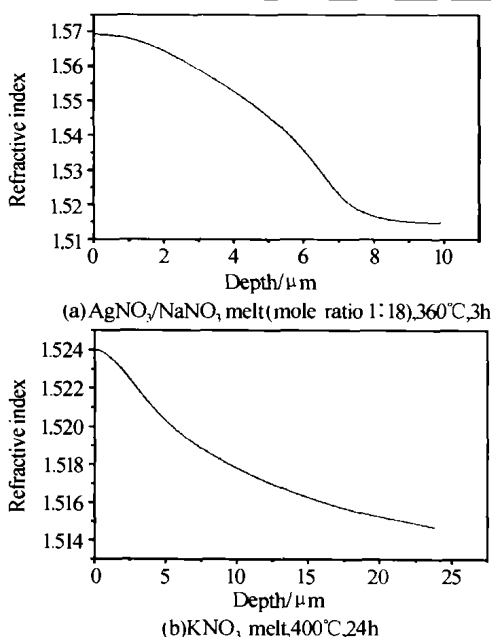


图 4 离子交换玻璃波导折射率分布曲线

Fig. 4 Refractive-index curves of ion exchange glass waveguides

列于表 1 中。图 4 是两种波导样品的折射率分布曲线。该测量结果主要与所测得的 θ_m 角的精度有关,而我们测角转盘的精度优于 1",因此能保证测量结果的准确性。

3 结论

利用棱镜耦合原理与改进的反 WKB 理论,实现了平面光波导折射率分布的测定。通过该方法获得了 BK7 玻璃在 360 °C 的 $\text{AgNO}_3/\text{NaNO}_3$ 熔液(摩尔比 1:18)中离子交换反应 3 小时以及 400 °C 的 KNO_3 熔液中反应 24 h 制得的波导样品的折射率分布曲线。该方法具有操作简单、测量准确的优点。

参考文献

- Lopez-Lago E, Linares J, Salmio R P, et al. Modeling and interference-microscopy characterization of graded index transitions in ion-exchange waveguide integrated elements: transitions between annealed surfaces. *Optical and Quantum Electronics*, 2000, 32 (11): 1269 ~ 1281

- 2 Lin J H, Chen C K. An inverse algorithm to calculate the refractive index profiles of periodically segmented waveguides from the measured near-field intensities. *Journal of Lightwave Technology*, 2002, **20**(1): 58 ~ 64
- 3 Djulgerova R, Pantchev B, Mihailov V, *et al.* Concentration profiles of ion exchanged optical waveguides in glass: analysed in hollow cathode plasma. *Surface & Coatings Technology*, 2003, **166**(2-3): 201 ~ 205
- 4 刘金城,鲁建业,田雪松,等. 磁控溅射法制备二氧化钒薄膜最佳参量的研究. 光子学报,2003,**32**(1):65 ~ 67
Liu J C, Lu J Y, Tian X S, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(1):65 ~ 67
- 5 姜永睿,胡雄伟,杨沁清,等. 溶胶-凝胶法制备光波导薄膜及性质的研究. 光子学报,2004,**33**(9):1140 ~ 1143
Jiang Y R, Hu X W, Yang Q Q, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(9):1140 ~ 1143
- 6 黄腾超,沈亦兵,侯西云,等. $K^+ - Na^+$ 二次离子交换制作玻璃波导. 光子学报,2003,**32**(11):1325 ~ 1328
Huang T C, Shen Y B, Hou X Y, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(11):1325 ~ 1328
- 7 Najafi S I. Introduction to Glass Integrated Optics. London: Artech House, 1992. 108 ~ 109
- 8 White J M, Heidrich P F. Optical waveguide refractive index profiles determined from measurement of mode indices; a simple analysis. *Applied Optics*, 1976, **15**(1): 151 ~ 155
- 9 Chiang K S. Construction of refractive-index profiles of planar dielectric waveguides from the distribution of effective indexes. *Journal of Lightwave Technology*, 1985, **LT-3**(2): 385 ~ 391
- 10 Chiang K S, Wong C L, Cheng S Y, *et al.* Refractive-index profiling of graded-index planar waveguides from effective indexes measured with different external refractive indexes. *Journal of Lightwave Technology*, 2000, **18**(10): 1412 ~ 1417

Measurement of Refractive-index Profiles for Planar Waveguides

Wei Jue, Xu Xiaofeng, Geng Heping, Kang Zhihui, Jiang Yun, Gao Jinyue
College of Physics, Jilin University, Key Lab for Coherent Light, Atomic and Molecular Spectroscopy,
Educational Ministry of China, Changchun 130023

Received date:2004-03-09

Abstract Based on the principle of prism coupling and improved inverse WKB theory, the refractive-index profiles of planar waveguides were measured. The refractive-index curves of ion exchange glass waveguides were obtained by this way. The method has advantages on convenient operation and accurate results.

Keywords Prism coupling; Planar waveguide; Refractive-index profile



Wei Jue was born in Henan Province in 1975. He received the B. S. degree and M. S. degree from the Physics Department of Zhengzhou University in 1998 and 2001, respectively. At present, he is a doctoral student and engaged in research on ion-exchanged waveguides for optical communication systems.