

单片集成玻璃光波导器件*

马少杰 赵伟 鲁平 李公羽 范俊清

(中国科学院长春物理研究所, 长春 130021)

傅绍军 陶晓明 洪义麟

(中国科技大学国家同步辐射实验室, 合肥 230026)

提要 制备了三元件集成玻璃光波导器件——两个光波导短程透镜、一个光波导光栅。采用 K^+/Na^+ 交换方法制备光波导。制备的器件用半导体激光测试, 用 CCD 和示波器接收观察光信号。实验观察到光波导光栅的 Bragg(布拉格)衍射, 衍射效率为 30%。

关键词 光波导, 光波导短程透镜, 光波导光栅, 布拉格衍射

1 引言

集成光学是光学的重要分支之一, 它对人们最有吸引力的特点之一是它能够将各种功能的分立光学器件集成到同一光学衬底表面的光波导上, 并在光波导上实现各种分立光学器件所能实现的处理光信号的功能。光波导器件与分立光学器件相比具有体积小、结构紧凑坚固、不受外界环境影响、长久保持不失效等优点。至今, 各种分立光学器件的功能都能在光波导上实现。其中, 部分光波导器件的性能比分立光学器件的性能更好, 达到的指标更高, 如光波导电光调制器^[1]、光波导声光器件^[2]、光波导陀螺仪^[3,4]等。正因为光波导器件具有如此多的优点, 因此, 该学科的研究十分活跃。目前, 光波导器件的研究正向着高指标、集成化、实用化发展。本文报道一种新的三元件集成的光波导器件——两个光波导短程透镜、一个光波导光栅。

本文将根据光波导短程透镜公式设计并制备了两个光波导短程透镜于同一光学衬底上。再在两个光波导短程透镜之间采用全息法制备胶掩膜光栅。采用离子蚀刻方法在玻璃表面制备玻璃光栅。制备好短程透镜、光栅的样品采用 K^+/Na^+ 交换的方法制备光波导, 实现三元件集成的玻璃光波导器件。制备好的样品用 $\lambda = 0.67 \mu\text{m}$ 半导体激光端面耦合输入光波导, 输出端用 CCD 接收光信号, 实验中观察到光波导光栅的布拉格衍射, 衍射效率高达 30%。

2 原理简述

图 1 为我们设计制备的单片集成光波导器件的结构原理图。光波导器件的输入输出端面

* 本工作由中国科学院青年基金、邮电部基金资助。

收稿日期: 1994 年 5 月 24 日; 收到修改稿日期: 1994 年 7 月 26 日

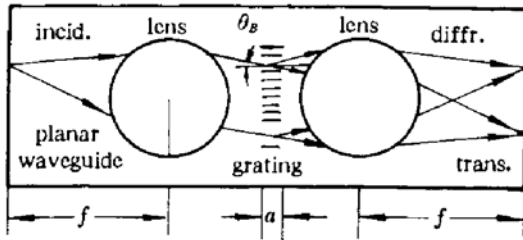


Fig. 1 Schematic diagram of a monolithic integrated device waveguide with spheroidal geodesic lenses and a grating

分别为输入输出光波导短程透镜的焦平面。因此,由输入端入射的单色光束,经第一个光波导短程透镜后准直成平行光束。平行光束的传输方向随输入端耦合点位置的改变而改变。经第一个光波导短程透镜准直的平行光束通过光波导光栅后,经过第二个光波导短程透镜被聚焦到光波导的输出端面。

实验中,改变入射端耦合点的位置,使得入射光栅平行光束的入射角发生改变。如果入射角 θ 满足布拉格条件,即 $\theta = \theta_b = \sin^{-1}(\lambda_0/2n\Lambda)$, λ_0

为单色光波长, n 为波导有效折射率, Λ 为光波导光栅周期。则经过光栅的平行光束将产生布拉格衍射。衍射光仍为平行光束,同透射光束一样,经过第二个光波导短程透镜被聚焦到光波导输出端面。在输出端面,透、衍射光斑相距为

$$S = 2ftg\theta_b \quad (1)$$

式中 f 为输出端光波导短程透镜的焦距。光波导光栅对以布拉格角入射的非单色平行光束产生色散。在输出端面,不同波长的光被展开成光谱序。

该器件的光波导短程透镜的焦距为^[5]

$$f = \frac{R_0}{2[1 - \cos(\sin^{-1}R_0/R)]} \quad (2)$$

式中 R_0 为凹球面上部开口的孔半径, R 为凹球面的曲率半径。凹球面的深度为

$$h = [R_0^3/(4f - R_0)]^{1/2} \quad (3)$$

凹球面的曲率半径为

$$R = \frac{1}{2h}(h^2 + R_0) \quad (4)$$

光波导短程透镜的参数,根据光波导光栅的布拉格衍射角,器件的尺寸,利用公式(2)~(4)合理的设计。

3 器件的制备及测试

3.1 器件制备

实验中选用 K_7 玻璃作为衬底制备单片集成光波导器件。衬底的尺寸为 $60 \times 20 \times 3.5 \text{ mm}^3$, 表面光学级抛光。准备好的样品先加工光波导短程透镜。

透镜的设计根据公式(2)~(4),并充分考虑入射光波导光束的发散角、光波导光栅的布拉格衍射角、衬底的尺寸、球差等因素设计光波导短程透镜的参数。我们设计的光波导短程透镜的参数分别如下: 下凹球面的曲率半径 $R = 10 \text{ mm}$, 凹坑深度 $h = 2 \text{ mm}$, 开口孔半径 $R_0 = 6 \text{ mm}$, 输入输出两端透镜尺寸相同, 两透镜中心间距 $d = 26 \text{ mm}$, 光波导短程透镜焦距 $f = 15 \text{ mm}$ 。透镜采用光学凹面镜的方法加工,边缘用手工抛光,透镜加工好后,再在透镜之间制备光波导光栅。

光波导光栅的制备采用两步实现。首先,采用全息双光束干涉法制备光刻胶掩膜光栅。光刻胶选用 ZA1350,涂胶厚约 $3 \mu\text{m}$,光栅周期取 $3 \mu\text{m}$,光栅宽度为 $50 \mu\text{m}$ 。制备的光栅用作离子

蚀刻玻璃光栅的掩膜。离子蚀刻胶光栅用作离子蚀刻玻璃光栅的掩膜。离子蚀刻玻璃光栅的时间由光刻胶光栅的掩膜时间决定。光刻胶厚度为 $3\ \mu\text{m}$ ，离子蚀刻速率为 $60\ \text{nm}/\text{min}$ ，因此，离子蚀刻的时间取 $50\ \text{min}$ 。图 2 所示为离子蚀刻玻璃光栅的电子显微镜照片。由照片可得实际制备的玻璃光栅的周期为 $2.85\ \mu\text{m}$ 。用干涉显微镜测试，玻璃光栅的槽深度为 $1.6\ \mu\text{m}$ 。制备好透镜、光栅的样品再制备光波导。

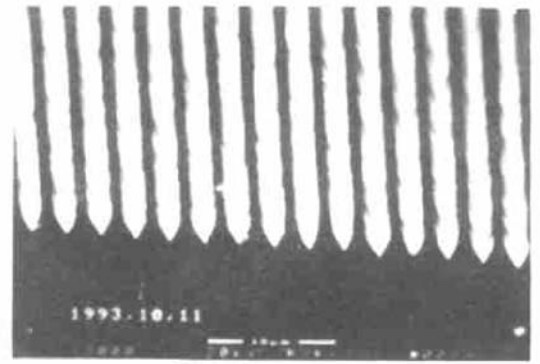


Fig. 2 Electron microscope photograph of a grating generated on glass by ion etching

实验中，采用常规的 K^+/Na^+ 交换工艺制备玻璃光波导。将装有硝酸钾的刚玉舟放入炉中加热至 $390\ \text{C}$ ，待硝酸钾完全熔化，并保持半小时使熔盐温度达 $390\ \text{C}$ 。将加工好的样品放入熔盐中保持 $3\ \text{h}$ 取出。熔盐中的 K^+ 离子交换玻璃表面的 Na^+ 离子，玻璃表面形成了高折射率的光波导层。光波导在 $632.8\ \text{nm}$ 有两个模式。再经端面抛光，样品制备完毕。

3.2 器件测试

图 3 所示为测试单片集成光波导器件的实验装置图。光源选用波长为 $0.67\ \mu\text{m}$ 的半导体激光器。激光束经自聚焦透镜聚焦到光波导端面，端面耦合输入光波导。经过器件后，光束又经 $10\times$ 的显微目镜，将光束聚焦到 CCD 器件上。并利用示波器观察 CCD 接收的光波导端面的近场光强分布。

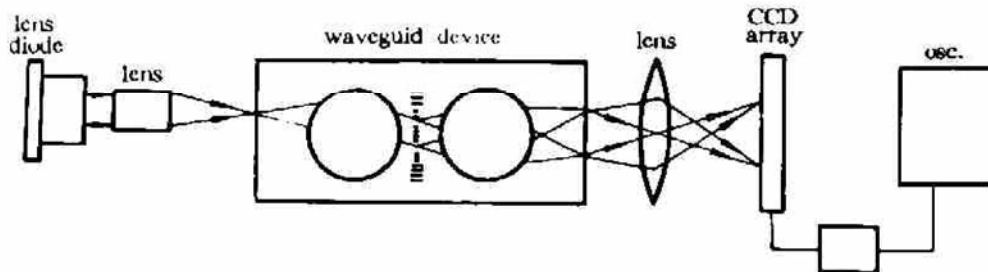


Fig. 3 Drawing of the experimental setup for measuring monolithic integrated waveguide device

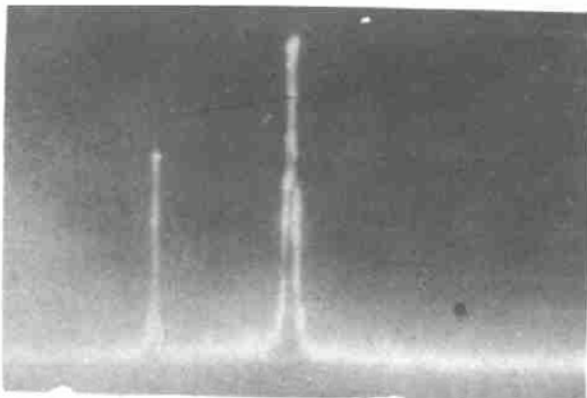


Fig. 4 Near-field profile of transmission(right) and Bragg diffraction(left) lights

由原理部分可知，当入射光束耦合点的位置发生变化时，将改变入射光栅平行光束的入射角。调节入射光波导耦合点的位置，并同时观察示波器。当调到某一位置附近，在示波器上观察到光波导光栅对入射光束产生的布拉格衍射。图 4 所示为 CCD 接收的、产生布拉格衍射时光波导输出端近场分布的示波器照片。照片中左边的曲线是衍射光在光波导输出端的光场分布，右边的曲线为透射光在光波导输出端的光场分布。

4 结果讨论及结论

由图 2 可得，光波导光栅的周期为 $2.85\ \mu\text{m}$ ，理论计算得光波导光栅的布拉格衍射角为

4. 49°。代入公式(1)可求得,在光波导输出端,透射与衍射光斑相距 2.36 mm。实验中测得透射与衍射光斑相距 2.3 mm。实验值与理论值相符。

由图 4 可得,光波导光栅衍射光场的峰值约为透射光的 60%。取光栅槽深 1.6 μm ,宽度为 50 μm ,有效折射率差 $\Delta N = 0.0006$,代入弱耦合衍射效率的理论公式^[6],得到布拉格衍射的衍射效率为 1.9%。可见衍射效率的理论值小于实验值。

我们根据棱镜耦合方法测试,理论计算得光波导深度为 5 μm 。可见光波导光栅的衍射已不满足弱耦合条件 $\Delta W/W \ll 1$ (ΔW 为光栅槽深度, W 为波导深度),所以,光波导光栅布拉格衍射效率的弱耦合理论已不适用于该器件。

综上所述,我们制备并测试了三元件单片集成玻璃光波导器件——两个光波导短程透镜、一个光波导光栅。观察到光波导光栅的布拉格衍射。光波导光栅的衍射效率可通过光栅槽深、宽、有效折射率适量的增加而提高。此外,该器件还可用于光波长滤波器、光束分束器、光通信波分复用器等等。如将该器件用于光通信波分复用器,需要合理的设计光栅的宽度,使得光栅对光通信波段(1.2~1.6 μm)有较高且均匀的衍射效率。根据理论计算,对 K^+/Na^+ 交换光波导,当光栅的宽度取 50~150 μm 范围,能得到理想的衍射效率。目前我们正在做这方面的研究。

参 考 文 献

- 1 E. Voges, A. Neyer. Integrated-Optic Devices on LiNbO_3 for Optical Communication. *J. Lightwave Tech.*, 1987, **LT-5**: 1229
- 2 C. S. Tsai. Guided-wave Acoustooptic Bragg Modulators for Wideband integrated-optic Communication and Signal Processing. *IEEE Trans. Circuits Syst.*, 1979, **cas-26**: 1072
- 3 W. J. Minford, F. T. Stone, B. R. Youmans *et al.*. Fiber Optic Gyroscope Using on Eight-component LiNbO_3 Integrated Optic Circuit. *Fiber Optic and Laser Sensors, SPIE*, 1989, **1169**: 304
- 4 T. Findakly, Silver Lane, M. Bramson. Advanced Integrated Optical Chip for Broad Range of Fiber Optic Gyro Applications. *Fiber Optic and Laser Sensors, SPIE*, 1989, **1169**: 413
- 5 D. B. Anderson, R. L. Davis, J. T. Boyd *et al.*. Comparison of Optical-waveguide Lens Technologies. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1977, **QE-13**: 275
- 6 H. Kogelnik. Coupled Wave Theory for Thick Hologram Gratings. *Bell Syst. Techn. J.*, 1969, **48**: 2909

Monolithic Integrated Glass Waveguide Device

Ma Shaojie Zhao Wei Lu Ping Li Gongyu Fan Junqing

(Changchun Institute of Physics, Academia Sinica, Changchun 130021)

Fu Shaojun Tao Xiaoming Hong Yilin

(National Synchrotron Lab., University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

Abstract Monolithic integrated glass waveguide device consists of three parts, two spheroidal geodesic lenses and an etched out waveguide grating. The waveguide was formed by K^+/Na^+ exchanging method. The device was measured with a semiconductor laser, and the optical signal received by CCD was displayed on an oscilloscope. The Bragg diffraction with an efficiency of 30 percent was observed experimentally.

Key words waveguide, waveguide spheroidal geodesic lens, waveguide grating, Bragg diffraction