

文章编号: 0253-2239(2006)07-1053-4

一种离子交换制备的玻璃光波导谐振腔滤波器^{*}

韩秀友^{1,2} 庞拂飞^{1,2} 蔡海文¹ 瞿荣辉¹ 方祖捷¹

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)
(² 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 采用 AgNO₃、KNO₃ 混和熔盐作为离子交换源, 在 K9 玻璃上制备了跑道形谐振腔滤波器。测试得到该滤波器的自由光谱范围为 0.178 nm, 两个输出端口的衬比度分别为 1.47 dB 和 6.5 dB, 分析得到耦合器的分束比和谐振腔的传输损耗分别为 $\kappa=0.16$ 和 $\alpha=8.1$ dB/cm。利用热光效应在 16 °C 的温度变化范围内, 滤波器实现了 2π 的相位调制, 同时分析得到波导材料的热光系数约为 $1.28 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ 。

关键词: 集成光学; 跑道形谐振腔; 离子交换; 热光效应

中图分类号: TN265 文献标识码: A

Optical Waveguide Ring Resonator Filter by Using Ion-Exchanged Glass

Han Xiuyou^{1,2} Pang Fufei^{1,2} Cai Haiwen¹ Qu Ronghui¹ Fang Zujie¹

(¹ Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)
(² Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

Abstract: A racetrack waveguide resonator filter was fabricated on K9 glass by ion-exchange in mixed melt salt of AgNO₃ and KNO₃. The free spectral range of the filter was 0.178 nm, and the contrast of the two output ports were 1.47dB and 6.5 dB, respectively. From the measurement parameters, the splitting ratio of the coupler and propagation loss of the resonator were analyzed to be 0.16 and 8.1 dB/cm. The phase shift of 2π was realized by using thermo-optical effect within 16 °C temperature change, and the thermo-optical coefficient of the waveguide material was about $1.28 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$.

Key words: integrated optics; racetrack resonator; ion exchange; thermo-optical effect

1 引 言

多功能平面光波导集成是光波导技术发展的重要方向之一, 是光通信、光信息处理领域研究的热点。波导环形谐振腔是平面光波导器件中的一个基本结构单元, 以它为主体可以构成具有各种不同功能的光波导器件, 如滤波器、光开关、光分插复用器、波导传感器等^[1~4]。各国研究机构竞相采用各种工艺技术在不同的波导材料上实现了波导环形谐振腔器件。离子交换工艺是一种制作工艺简单、成本低廉的平面光波导制备技术, 利用该技术制成的玻璃波导具有传输损耗小、折射率及模场分布与光纤匹配良好、便于集成等优点, 被广泛应用于集成光波导

器件的研究与制备^[5~11]。

在离子交换过程中, 熔盐中的金属阳离子 A⁺ 进入到玻璃中, 玻璃中的金属阳离子 B⁺ 被置换出来, 从而引起交换处折射率的改变。引起折射率改变的机理主要有以下三点^[5]: 1) 交换离子的半径不同引起玻璃内部结构和摩尔体积发生变化; 2) 交换离子的电位移极化率不同引起电位移极化率改变; 3) 离子扩散引起玻璃内部应力的变化。

在不同的玻璃衬底中可进行不同的离子交换, 研究得较多的是玻璃衬底中的 Na⁺ 与 Cs⁺、Li⁺、K⁺、Ag⁺ 等进行交换, 其中 Cs⁺-Na⁺ 交换折射率变化比较高但成本也高; Li⁺-Na⁺ 交换时间快, 但损耗

^{*} 上海市科委光科技项目(022261009)资助课题。

作者简介: 韩秀友(1977~), 男, 河北沧州人, 中国科学院上海光学精密机械研究所博士研究生, 主要从事集成光学光波导器件及特性的研究。E-mail: hanxiuyou@mail.siom.ac.cn

收稿日期: 2005-05-25; 收到修改稿日期: 2005-10-20

比较大; $K^+ - Na^+$ 交换由于扩散速度慢, 要达到一定的折射率改变量需要很长的交换时间; $Ag^+ - Na^+$ 交换温度比较低, Ag^+ 离子半径与 Na^+ 离子半径之间相差不大, 而 Ag^+ 的电位移极化率比 Na^+ 大很多, 因此可以获得比较大的折射率变化, 所以被研究得较多, 但是纯 $AgNO_3$ 交换时, 由于 Ag 离子的扩散速率较快使得波导折射率改变量不易控制, 同时由于 Ag 离子易被还原成金属态附着在波导表面, 浓度过高会导致波导的传输损耗增大。

本文采用 $AgNO_3$ 、 KNO_3 混和熔盐作为离子源, 利用 KNO_3 来稀释熔盐中银离子的浓度, 在 K9 玻璃基片上制备了跑道形谐振腔滤波器, 对器件的滤波特性进行了测试和分析。

2 跑道形谐振腔滤波器结构与制备

跑道形谐振腔滤波器结构如图 1 所示, 该结构与传统“点接触”耦合的环形结构相比, 只需调整耦合区的长度就可以到达一定的分束比, 而无需非常小的耦合区间距, 从而降低了波导制作的难度。Z 端口弯转 180° 使得该端口与 Y 端口在同侧, 有利于器件测试。根据传输矩阵法可以求出在端口 Y 和端口 Z 的输出谱分别为

$$T_Y = \left| \frac{\sqrt{R_1} - \sqrt{R_2} \sqrt{\gamma} \exp(-jnkL)}{1 - \sqrt{R_1 R_2} \sqrt{\gamma} \exp(-jnkL)} \right|^2, \quad (1)$$

$$T_Z = \left| \frac{j \sqrt{R_1 R_2} \sqrt{\gamma} \exp(-jnkL)}{1 - \sqrt{R_1 R_2} \sqrt{\gamma} \exp(-jnkL)} \right|^2, \quad (2)$$

其中 $R_{1,2} = 1 - \kappa_{1,2}$, $\kappa_{1,2}$ 分别为两个耦合器的分束比, $\gamma = \exp(-\alpha L)$, α 为波导传输损耗, n 为波导的等效折射率, k 为真空中的波数, $L = 2\pi r + 2L_c$ 为谐振腔的周长, r 为弯曲波导的曲率半径, L_c 为耦合区的长度。

我们设计的波导结构参量为, 波导宽度 $w = 6 \mu\text{m}$, 耦合区长度 $L_c = 0.5 \text{ mm}$, 耦合器波导间距 $s = 4 \mu\text{m}$, 弯曲半径 $r = 1.2 \text{ mm}$ 。波导器件是以国产 K9 光学玻璃为衬底, 采用 $AgNO_3$ 、 KNO_3 混和

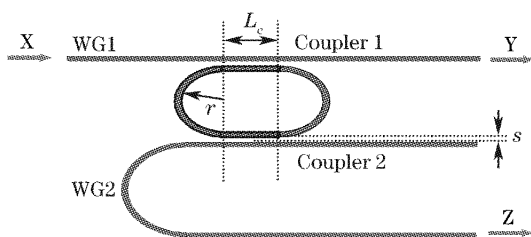


图 1 跑道形谐振腔滤波器结构示意图

Fig. 1 Sketch of racetrack resonator filter

熔盐作为离子源进行离子交换, KNO_3 的引入稀释了熔盐中银离子的浓度, 使得形成波导的折射率改变量容易控制, 对不同浓度配比的混合熔盐进行离子交换研究, 我们发现熔盐摩尔比为 $N(AgNO_3) : N(KNO_3) = 2 : 98$, 在 340°C 下交换 4 h 左右可以得到单模波导。在此基础上制备波导谐振腔滤波器, 具体的制作工艺如下:

- 1) 以 K9 玻璃为衬底, 经切割、精磨、精抛光制成标准衬底片, 尺寸为 $25 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 0.8 \text{ mm}$;
- 2) 用射频溅射技术镀 150 nm 左右厚的 Ti 膜;
- 3) 光刻后用 H_2SO_4 腐蚀液 80°C 水浴腐蚀, 制备出 Ti 掩蔽图形;
- 4) 在 340°C 的 $N(AgNO_3) : N(KNO_3) = 2 : 98$ 混和熔盐中交换 4 h;
- 5) 去掉 Ti 掩蔽膜, 端面进行切割抛光。

3 器件特性的测试及分析

利用自发辐射噪声 (ASE) 宽带光源和光谱分析仪 (ANDO 公司, AQ6317C) 对波导器件的特性进行了测试。将 HF 酸腐蚀得到的锥形光纤利用电弧法制成微透镜, 以便于光的耦合, 通过五维精密调整架 (Newport 公司, 516-FC) 的调谐实现光纤与波导的耦合。图 2 中的点线分别为在端口 Y 和端口 Z 测得的输出光谱特性曲线。从图 2 可以看出滤波器两个输出端口的衬比度分别为 1.47 dB 和 6.5 dB , 自由光谱范围为 $R_{FS} = 0.178 \text{ nm}$, 由公式 $R_{FS} = \lambda_0^2 / nL$ 可得对应谐振波长 $\lambda_0 = 1530.4 \text{ nm}$ 的折射率为 $n = 1.5401$ 。该滤波器的自由光谱范围较小, 主要是由于环的弯曲半径较大, 可以通过减小环的弯曲半径来缩短环周长, 增大自由光谱范围, 使得器件更利于实用化。

根据文献[12]可知, 对于单环加一个直波导的谐振腔滤波器, 其谐振腔的传输损耗和耦合器的分束比可由实验测得的衬比度和 3 dB 带宽求得。对于本文中单环加两个直波导构成的谐振腔滤波器, 经过第二个条波导 (WG2) 耦合出的光可以看作是谐振腔的损耗, 由于设计的两个耦合器结构参量相同, 最后制得波导器件在显微镜下观察, 其两个耦合器也基本上完全一致, 故可以认为两个耦合器的分束比相同, 即 $R = R_1 = R_2 = 1 - \kappa$ 。令 $\gamma' = \gamma R$, (1) 式可以改写为

$$T_Y = \frac{R + \gamma' - 2 \sqrt{R\gamma'} \cos(nkL)}{1 + R\gamma' - 2 \sqrt{R\gamma'} \cos(nkL)}, \quad (3)$$

于是根据文献[12]方法, 利用 Y 端口输出谱测量的参

量可以求出耦合器的分束比 κ 和损耗系数 γ' , 真正的谐振腔损耗系数进一步由 $\gamma = \gamma'/R$ 求得。由图 2(a) 输出谱测量得到的衬比度为 $C_r = 1.47$ dB, 3 dB 带宽为 $\delta\lambda = 0.06$ nm, 计算得到的分束比和传输损耗分别为 $\kappa = 0.16$ 、 $\alpha = 8.1$ dB/cm。图 2 中的实线为根据(1)式、(2)式按照此参量计算得到的光谱曲线。由图 2 可以看出, Z 端口输出谱的实验结果与理论计算基本

吻合, Y 端口输出谱的实验结果与理论计算相比在峰值处稍有差别, 我们推测这可能是由于实际中波导耦合器对不同波长的光分束比和耦合损耗不同造成的。同时我们发现谐振腔的传输损耗比较大, 这可能主要是由于一次离子交换引起波导表面不规则和缺陷造成的散射损耗较大, 可以通过二次离子交换形成掩埋型波导来降低散射损耗。

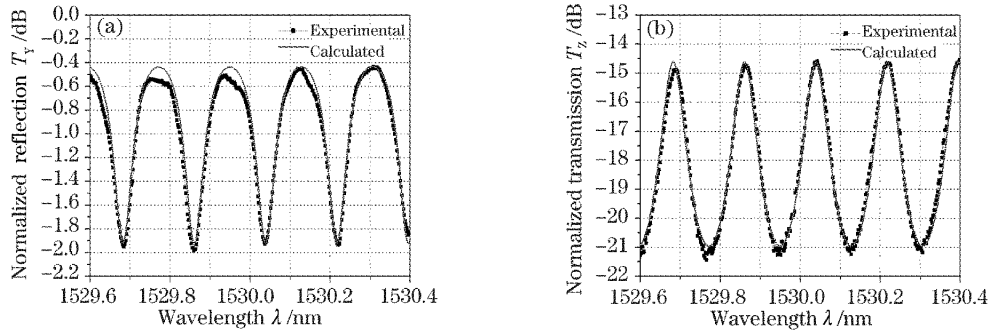


图 2 跑道形谐振腔的输出谱形。(a)Y 端口的输出谱,(b)Z 端口的输出谱

Fig. 2 Reflection and transmission spectra of a racetrack resonator. (a) Reflection from Port Y, (b) transmission from Port Z

我们还对由热光效应引起的谐振腔滤波器相移特性进行了测试。将波导器件固定在一个小的电阻加热器上, 采用精密控温仪控制其温度变化。温度变化间隔为 2 $^{\circ}\text{C}$, 每次待温度稳定后测量端口 Z 输出谱的中心波长, 测试结果如图 3 所示。由图 3 可以看出温度变化 16 $^{\circ}\text{C}$ 时相位移了 2π (即一个自由光谱范围)。根据谐振条件 $nL = m\lambda_0$, 波导材料的热光系数可由下式求得

$$C = \frac{\Delta\lambda}{\Delta T} \frac{n}{\lambda_0}, \quad (4)$$

根据实验测得的数据 $\Delta\lambda/\Delta T = 0.01271$ nm/ $^{\circ}\text{C}$, $n = 1.5401$ 和 $\lambda_0 = 1530.04$ nm, 热光系数约为 $1.28 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ 。未进行离子交换的普通 K9 玻璃的热光系数^[13]为 $C = 0.29 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$, 由此可以看

出, 离子交换过程中银离子的引入增大了材料的热光系数。

4 结 论

在 K9 玻璃上利用离子交换技术制备了跑道形波导谐振腔滤波器, 对其滤波特性进行了测试和分析。得到两个输出端口的衬比度分别为 1.47 dB 和 6.5 dB, 耦合器的分束比和谐振腔传输损耗分别为 $\kappa = 0.16$ 、 $\alpha = 8.1$ dB/cm, 利用热光调制作用在 16 $^{\circ}\text{C}$ 的变化范围内实现了 2π 的相移, 波导材料的热光系数约为 $1.28 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ 。该滤波器可以用于滤波、传感等领域, 也可与其它波导结构相结合实现新的功能。通过减小环的周长可以扩大滤波器的自由光谱范围, 同时可采用二次离子交换工艺形成掩埋型波导来降低波导损耗, 相关工作正在研究之中。

参 考 文 献

- 1 V. Van, T. A. Ibrahim, K. Ritter *et al.*. All-optical nonlinear switching in GaAs-Al-GaAs microring resonators [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(1): 74~76
- 2 J. M. Choi, R. K. Lee, A. Yariv. Control of critical coupling in a ring resonator-fiber configuration; application to wavelength-selective switching, modulation, amplification, and oscillation [J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(16): 1236~1238
- 3 B. E. Little, S. T. Chu, H. A. Haus *et al.*. Microring resonator channel dropping filters[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(6): 998~1005
- 4 R. W. Boyd, J. E. Heebner. Sensitive disk resonator photonic biosensor[J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(31): 5742~5747

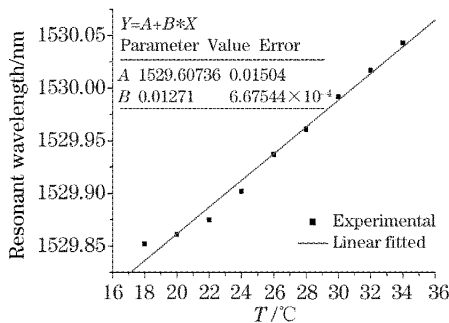


图 3 谐振波长的漂移随温度变化的关系

Fig. 3 Resonant wavelength shift of the racetrack resonator with temperature

- 5 R. V. Ramaswamy, R. Srivastava. Ion-exchanged glass waveguides: a review. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 1988, **6** (6): 984~1002
- 6 Chen Haiyan, Dai Jizhi, Yang Yapei *et al.*. Er³⁺, Yb³⁺ codoped phosphate glass channel waveguide amplifiers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(7): 815~818 (in Chinese)
陈海燕,戴基智,杨亚培等. Er³⁺, Yb³⁺共掺磷酸盐玻璃沟道波导放大器[J]. *光学学报*, 2003, **23**(7): 815~818
- 7 Ma Huilian, Wang Minghua, Li Xihua *et al.*. Study and fabrication of 1×8 MMI optical power splitter in glass material [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(5): 580~583 (in Chinese)
马慧莲,王明华,李锡华等. 离子交换玻璃波导1×8多模干涉光功分器的研制[J]. *光子学报*, 2002, **31**(5): 580~583
- 8 Wang Jiehong, Mu Huan, Jin Guoliang *et al.*. Characterization of erbium doped phosphate glass waveguide amplifiers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(1): 99~104 (in Chinese)
王洁红,慕桓,金国良等. 掺铒磷酸盐玻璃波导放大器的特性研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(1): 99~104
- 9 Zheng Jie, Wang Pengfei, Xu Mai *et al.*. Characterization of ion exchange erbium doped silica glass amplifiers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(12): 1418~1423 (in Chinese)
郑杰,王鹏飞,徐迈等. 离子交换铒掺杂硅酸盐玻璃波导光放大特性[J]. *光学学报*, 2003, **23**(12): 1418~1423
- 10 Zigang Zhou, Desen Liu. 1×4 buried optical power splitter fabricated by Tl⁺-Na⁺ ion-exchange [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(11): 651~652
- 11 Shilong Zhao, Baoyu Chen, Junjiang Hu *et al.*. Planar waveguides formed in a new chemically stable Er³⁺/Yb³⁺ codoped phosphate glass[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(2): 101~102
- 12 C. K. Madsen, Jian H. Zhao. *Optical Filter Design and Analysis: a Signal Processing Approach* [M]. John Wiley & Sons, INC. 1999. 365~369
- 13 Cai Borong. *Integrated Optics* [M]. Chengdu: University of Electric Science and Technology of China Press, 1990. 144 (in Chinese)
蔡伯荣. *集成光学*[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 1990. 144