

文章编号: 0253-2239(2007)11-1935-4

# 全光纤型微环谐振器的研制\*

董小伟 裴 丽 冯素春 鲁韶华 许 鸥

(北京交通大学光波技术研究所全光网与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044)

**摘要:** 环形谐振器因体积小、功能强、结构简洁等优点长期以来一直在光无源、有源器件的设计和制作中发挥着重要的作用。对光纤的弯曲损耗特性进行了深入分析,指出只有采用微细光纤才能降低全光纤型所制作的环形谐振器的尺寸,加宽器件的自由光谱范围(FSR)获得更好的精细度和品质因子。然后,在改进熔融拉锥技术的同时,保持慢变、绝热条件拉制出在 80 mm 长度范围内具有良好均匀性、半径为 5  $\mu\text{m}$  的高质量微细光纤,在此基础上采用自缠绕法研制出半径仅为 500  $\mu\text{m}$ ,谐振效果明显加强的全光纤型微环谐振器,从而很好地解决了集成型微环谐振器较高的弯曲损耗和连接损耗问题。

**关键词:** 光通信; 光纤器件; 微环谐振器; 微细光纤; 熔融拉锥

中图分类号: TN929.11; TN253 文献标识码: A

## Study and Fabrication of All-Fiber Microring Resonator

Dong Xiaowei Pei Li Feng Suchun Lu Shaohua Xu Ou

(The Key Laboratory of All Optical Network & Advanced Telecommunication Network, Education Ministry of China, Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044)

**Abstract:** Ring resonators have been playing a very important role in the design and fabrication of active and passive optical devices due to their small size, multi-function and compactness. Bend loss characteristics of optical fiber are investigated thoroughly, and the results show that all-fiber resonator with smaller ring radius, wider free spectral range (FSR), higher fineness ( $f$ ) and quality factor ( $Q$ ) can be achieved only by microfiber. Based on the improved fused taper technique, under the condition of slow change and adiabatic condition, a 5  $\mu\text{m}$ -radius high-quality microfiber with uniform waist length of 80 mm is fabricated. And utilizing self-wrapping coupling method, an all-fiber microring resonator with 500  $\mu\text{m}$  radius is realized, which exhibits good resonant response. This all-fiber device is expected to avoid the large bendloss and connection loss induced by planar waveguide integration.

**Key words:** optical communication; optical fiber device; microring resonator; microfiber; fused taper

## 1 引 言

环形谐振器具有体积小、功能强、结构简洁等优点,利用环形谐振器制作的有源和无源器件一直在光通信<sup>[1~3]</sup>和光传感<sup>[4]</sup>领域发挥着重要的作用。

平面波导是目前制作环形谐振器最常采用的一种方法,随着工艺的日益改进,利用 InGaAsP/InP、 $\text{Ta}_2\text{O}_5 \cdot \text{SiO}_2$ 、Si、SiN、SiON、Hydex、Polymer 等材料已可制作出半径小于 50  $\mu\text{m}$  的微环谐振器,从而大大提高了器件的集成度(在 1  $\text{cm}^2$  的半导体芯片上就可集成大约  $10^4 \sim 10^5$  个微环谐振器<sup>[5]</sup>)。但是,与其它集成器件一样,较高的弯曲损耗、散射损耗,以及与通信光纤因失配造成的连接损耗仍是限

制微环谐振器实际应用的主要障碍。近年来,许多研究者提出采用熔融拉锥<sup>[6]</sup>或侧面研磨<sup>[7]</sup>的普通光纤作为与微环谐振腔耦合的输入/输出直波导,来降低与通信光纤的熔接困难。但是,普通光纤与构成微环谐振腔的结构、材料间存在较大的差异,致使耦合效率很低,很难实现良好的谐振效果。

为解决上述问题,本文对光纤弯曲特性进行详细分析后,提出一种利用熔融拉锥形成的高质量微细光纤,自缠绕制作全光纤型微环谐振器的方法。

## 2 理论基础

单环谐振器通常具有图 1 所示的两种形式<sup>[8]</sup>,

\* 国家自然科学基金(60607001)、新世纪优秀人才支持计划(NCET-05-0091)和北京交通大学人才基金(2007RC015)资助课题。

作者简介: 董小伟(1978—),女,天津人,讲师,主要从事光通信器件方面的研究。E-mail: way7803@163.com

收稿日期: 2007-01-31; 收到修改稿日期: 2007-06-04

当结构(a)中的归一化耦合系数  $k_a$  与结构(b)的归一化耦合系数  $k_b$  满足  $k_b = j \sqrt{1 - k_a^2}$  ( $j = \sqrt{-1}$  为虚数)时,两者等效。

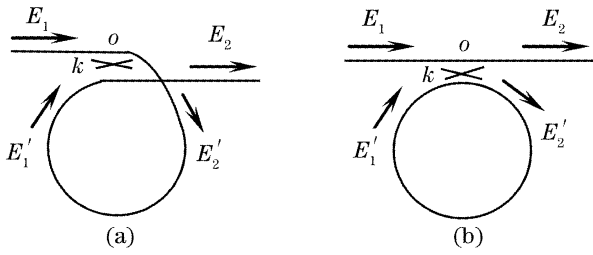


图 1 单环谐振器的两种等效形式

Fig. 1 Two equivalent configurations of microring resonator

将单环谐振器拆分为方向耦合器与环波导两部分,采用传输矩阵法推导出通路传输函数为<sup>[9]</sup>

$$|T| = \left| \frac{E_2}{E_1} \right|^2 = \frac{k^2 + 2k\tau \sin \phi + \tau^2}{1 + 2k\tau \sin \phi + k^2 \tau^2}, \quad (1)$$

其中  $k = \exp(j\beta l) \sin(cl)$  为归一化耦合系数( $c, l, \beta$  分别为耦合区的耦合系数、耦合长度和传输常量);  $\tau = \exp(-\alpha \cdot 2\pi R)$  和  $\phi = \beta \cdot 2\pi R$  分别为光信号在谐振腔中循环一周引入的归一化传输损耗和相移,  $R, \alpha$  为环半径和弯曲损耗系数。

环形谐振器的性能主要由自由光谱范围  $R_{fs}$ 、精细度  $f$  和品质因子  $Q$  三个参量来表征,其定义分别为<sup>[10]</sup>:

$$R_{fs} = \lambda_{m+1} - \lambda_m \approx \frac{\lambda^2}{2\pi n_{eff} R}, \quad (2)$$

$$f = \frac{R_{fs}}{\Delta\lambda_{FWHM}} \approx \frac{1}{\alpha R}, \quad (3)$$

$$Q = \frac{\lambda_m}{\Delta\lambda_{FWHM}} \approx \frac{2\pi n_{eff}}{\alpha \lambda_m}, \quad (4)$$

其中  $n_{eff}$  为有效折射率,  $\lambda_m, \Delta\lambda_{FWHM}$  为第  $m$  个谐振峰的中心波长和半峰全宽。

从上面公式可以看出:降低谐振腔的半径及弯曲损耗是扩展自由光谱范围、提高精细度和品质因子的主要方法,也是改进制作工艺、加强器件性能的研究目标。但是,环半径减小导致弯曲损耗增加,从而引起信号功率衰减,根据文献[11],环形谐振腔的弯曲损耗系数可表示为

$$\alpha = \frac{1}{2} \left( \frac{\pi}{r_1 R} \right)^{1/2} \frac{U^2}{V^2 W^{3/2} K_1^2(W)} \exp\left(-\frac{4}{3} \frac{R}{r_1} \frac{W^3 \Delta}{V^2}\right), \quad (5)$$

其中  $r_1$  为纤芯半径,  $\Delta = \frac{n_{co}^2 - n_{cl}^2}{2n_{co}^2}$  为纤芯与包层间的相对折射率差,  $U = (k_0^2 n_{co}^2 - \beta^2)^{1/2} \cdot r_1, W = (\beta^2 - k_0^2 n_{cl}^2)^{1/2} \cdot r_1$  分别为纤芯和包层的横向传输

常量,  $V = (U^2 + W^2)^{1/2}$  为归一化频率,  $K_1$  为一阶第二类修正贝塞尔函数。

图 2 对普通单模光纤的弯曲特性进行了分析,从图可见:为避免引入较高的弯曲损耗应使  $R \geq 10^{3.6} \cdot r_1$ ,即基于普通光纤的环形谐振器最小半径应大于 3 cm,导致谐振响应自由光谱范围仅为 0.008 nm(近似 1 GHz),不能满足高速光通信系统的要求。在保证较低弯曲损耗的情况下,为降低环形谐振器的尺寸、提高器件性能,从(5)式可以看出,应采用半径更小的微细光纤。

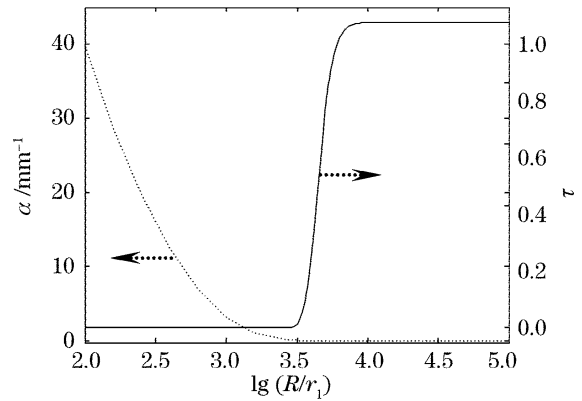


图 2 普通单模光纤的弯曲损耗特性

Fig. 2 Bend loss characteristics of single-mode fiber

### 3 全光纤型微环谐振器的制作方法

如果采用预制棒拉丝工艺制作微细光纤,不仅成本很高,与普通光纤因失配造成的熔接困难也将抵消全光纤微环谐振器的优势,而且光纤半径整体减小也会极大地减弱其机械强度,使所制作器件容易损坏。由于双锥形光纤是从普通单模光纤熔融拉制成的一种直径逐渐变化的光纤,其结构在两端保持不变,与通信光纤的熔接十分简单方便,而在中间腰部光纤直径极大降低,具有微细光纤的特性。

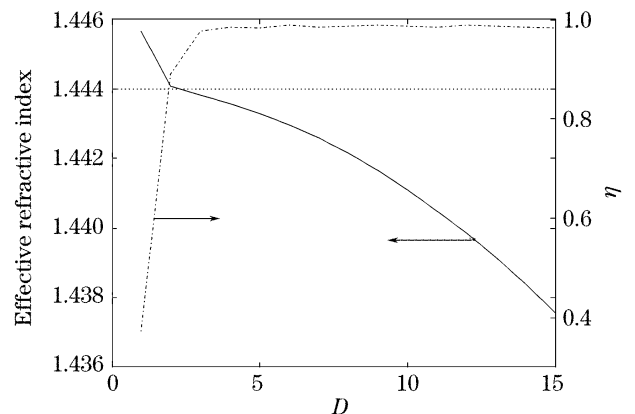
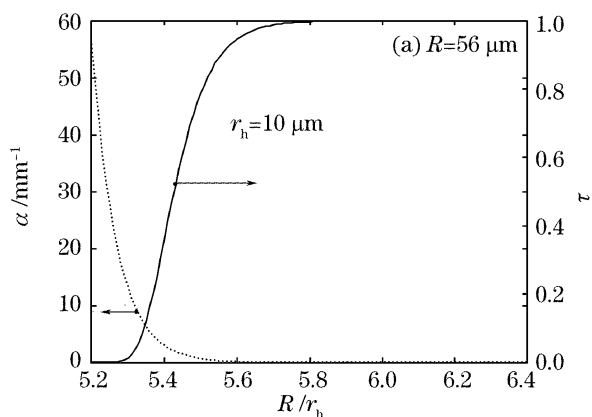


图 3 拉锥比对光纤基模有效折射率和包层功率分布的影响  
Fig. 3 Influence of taper ratio on effective refractive index and power distribution of fiber's fundamental mode

在拉锥过程中纤芯与包层成比例减小,但折射率分布保持不变。定义拉锥比  $D=r_q/r_h$ , 其中  $r_q$ 、 $r_h$  分别为拉锥前、后的纤芯半径,图 3 给出了拉锥比对光纤基模有效折射率及其功率分布特性  $\eta = \frac{P_{\text{clad}}}{P_{\text{clad}} + P_{\text{core}}}$  的影响。随着光纤半径的降低,基模场分布不断向包层扩散,当拉锥前后光纤半径比大于 2.3, 即当普通单模光纤从  $62.5 \mu\text{m}$  拉细到  $27.5 \mu\text{m}$



以下时,基模有效折射率将小于包层折射率,此时纤芯与包层间的边界将无法继续支持基模的全反射条件,此时需要采用文献[12]提出的理论模型,对熔融拉锥所形成双锥光纤的弯曲特性进行分析。图 4 为不同拉锥程度下,光纤弯曲损耗的比较,从图 4 可见,加大拉锥程度( $r_h$  减小),对制作尺寸更小的环形谐振器非常有利。

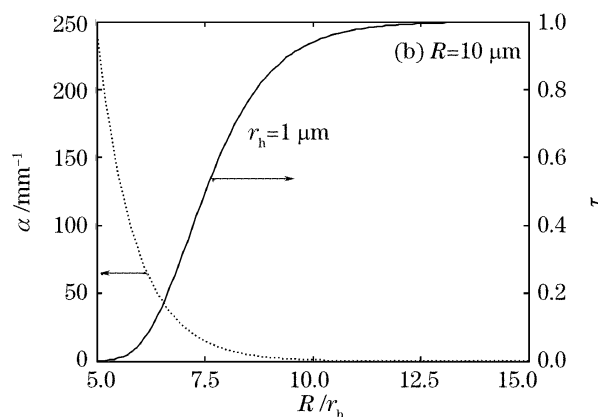


图 4 不同拉锥程度下,微细光纤可构成的微环谐振器的最小半径

Fig. 4 Minimum radius of microring resonator under different taper ratio

## 4 实验结果

在实验中,为制作出高质量的微细光纤,在拉锥过程中保持慢变、绝热条件的同时改进熔融拉锥设备,对气体流量和拉锥时所加应力进行控制,以便双锥光纤的整个微细腰部保持均匀一致,并使其长度足以构成环形谐振腔。图 5 为显微镜下普通单模光纤与所拉制微细光纤的对比,观测结果显示在大约 80 mm 长度范围内,该微细光纤的半径基本保持  $5 \mu\text{m}$ 。

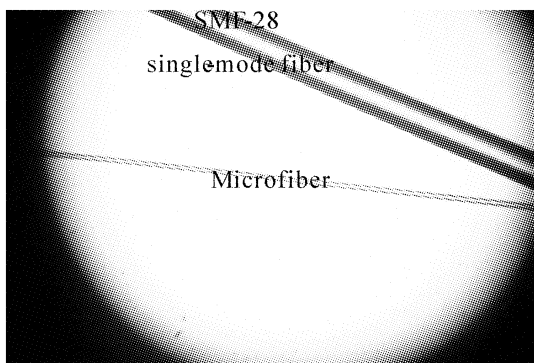


图 5 微细光纤与单模光纤的对比

Fig. 5 Comparison microfiber with single-mode fiber

图 6 对该微细光纤的插入损耗进行了测试(图中从上到下各曲线依次是:a 水平直放;b 弯曲半径很大;c 弯曲成  $R=5 \text{ mm}$  的环,置于空气中;d 弯曲成  $R=5 \text{ mm}$  的环,置于酒精中;e 弯曲成  $R=100$

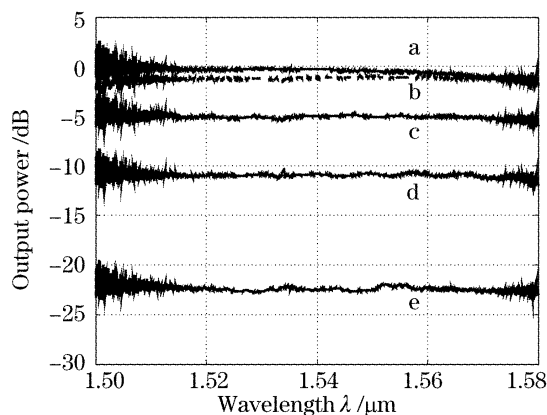


图 6 微细光纤插入损耗的测试结果

Fig. 6 Measured insertion loss of microfiber

$\mu\text{m}$  的环,置于酒精中);当微细光纤水平直放时,其插入损耗很小,说明熔融拉制的微细光纤具有很好的质量;然而当对光纤腰部进行弯曲(光纤间不接触,不形成耦合谐振)时,随着弯曲程度的增加,光纤输出功率不断降低,因此在下面制作环形谐振器时,并未将微细光纤弯曲到其理论最小,而是将环半径设置在近似  $500 \mu\text{m}$ 。同时还发现,微细光纤对外界环境变化非常敏感,这不仅为调节微环谐振器所处环境、提高耦合区的耦合效率提供了方便,还指明了微细光纤在化学和生物传感领域的应用前景。图 7 为采用自缠绕法,利用微细光纤构成的全光纤型微环谐振器。

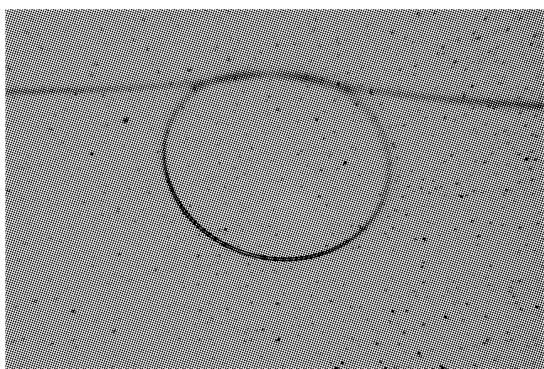


图 7 微细光纤制作的全光纤微环谐振器

Fig. 7 All-fiber microring resonator fabricated by microfiber

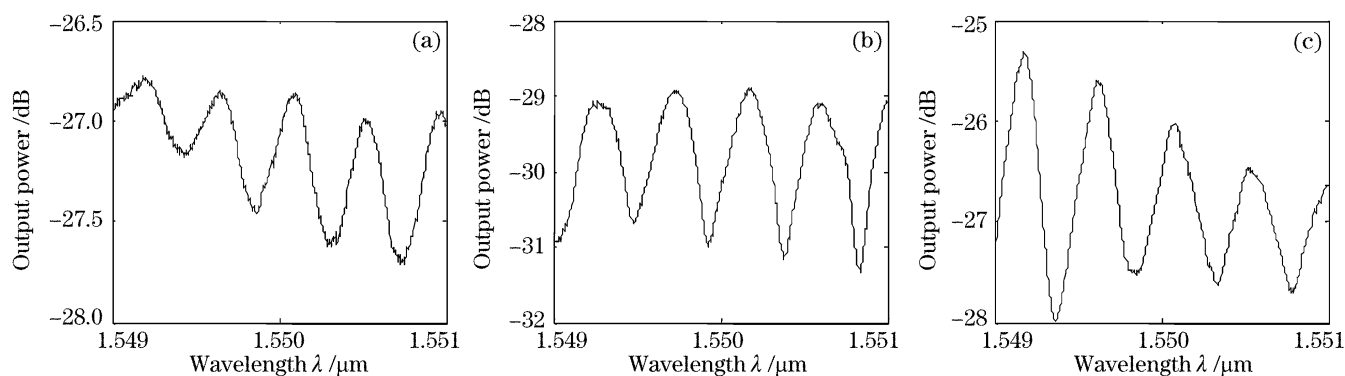


图 8 控制缠绕耦合区,调节微环谐振器的光谱响应

Fig. 8 Spectral responses of microring resonator are adjusted by controlling self-wrapping coupling region

## 5 结 论

在深入分析微细光纤弯曲损耗及耦合特性的基础上,指出微细光纤制作全光纤型微环谐振器的可行性,并且利用熔融拉制出的半径为  $5\ \mu\text{m}$  的高质量微细光纤,采用自缠绕法研制出半径仅为  $500\ \mu\text{m}$ ,具有良好谐振效果的全光纤微环谐振器。这种结构简单、成本很低的全光纤型微环谐振器必将在未来的光通信和光传感领域具有广泛的应用前景。

## 参 考 文 献

- 1 Wang Xianyin, Ma Chungsheng, E. Shulin *et al.*. Theoretical analysis for transmission characteristics of polymer microring resonant wavelength multiplexer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(1): 45~50 (in Chinese)  
王现银,马春生,鄂书林等. 聚合物微环谐振波分复用器传输特性的理论分析[J]. *光学学报*, 2005, **25**(1): 45~50
- 2 C. K. Madsen, G. Lenz, A. J. Bruce *et al.*. Integrated all-pass filters for tunable dispersion and dispersion slope compensation [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(12): 1623~1625
- 3 Pang Fufei, Han Xiyou, Cai Haiwen *et al.*. Characteristics of an add/drop filter composed of Mach-Zehnder interferometer and double ring resonators[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(1): 21~23
- 4 A. Ksendzov, M. L. Homer, A. M. Manfreda. Integrated optics ring-resonator chemical sensor with polymer transduction

为测试所制作微环谐振器的响应,在实验中以掺铒光纤放大器宽带光源作为输入,然后使用分辨率为  $0.01\ \text{nm}$  的 ANDO AQ6317C 光谱分析仪在输出端监测。从图 8 可见,与在光纤研磨侧面制作的聚合物微环谐振器(文献[7]中图 4)相比,所制作的全光纤微环谐振器不仅器件结构更加简洁,而且谐振效果明显加强,这是由于采用一根连续微细光纤自缠绕构成谐振器,耦合区波导结构的匹配大大提高了耦合效率。同时利用耦合系数对波长的依赖性,控制微细光纤的缠绕区,还实现了对最大消光比所对应波长的调节(从长波长向短波长方向移动)。

layer[J]. *Electron. Lett.*, 2004, **40**(1): 63~64

- 5 S. Suzuki, Y. Hatakeyama, Y. Kokubun *et al.*. Precise control of wavelength channel spacing of microring resonator add-drop filter array[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2002, **20**(4): 745~750
- 6 J. C. Knight, G. Cheung, F. Jacques *et al.*. Phase-matched excitation of whispering gallery mode resonances by a fiber taper [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(15): 1129~1131
- 7 T. Sherwood, A. C. Young, J. Takayesu *et al.*. Microring resonators on side-polished optical fiber [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(10): 2107~2109
- 8 Otto Schwelb. Transmission, group delay, and dispersion in single-ring optical resonators and add/drop filters—a tutorial overview[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2004, **22**(5): 1380~1394
- 9 Dong Xiaowei, Pei Li, Jian Shuisheng *et al.*. Transfer Matrix method for analyzing the characteristics of multiple-ring higher order microring resonators[J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, **32**(7): 929~932 (in Chinese)  
董小伟,裴丽,简水生等. 传输矩阵法分析多环高阶谐振滤波器特性[J]. *中国激光*, 2005, **32**(7): 929~932
- 10 P. Rabiei, W. H. Steier, C. Zhang *et al.*. Polymer micro-ring filters and modulators [J]. *J. Lightwave Technology*, 2002, **20**(11): 1968~1975
- 11 M. Sumetsky, Y. Dulashko, A. Hale. Fabrication and study of bent and coiled free silica nanowires; self-coupling microloop optical interferometer[J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(15): 3521~3531
- 12 Limin Tong, Jingyi Lou, Eric Mazur. Single-mode guiding properties of subwavelength-diameter silica and silicon wire waveguides[J]. *Opt. Exp.*, 2004, **12**(6): 1025~1035