

基于微纳光纤的双环谐振腔理论与实验研究

杨飞亚¹ 吴宇¹ 饶云江^{1,2} 陈一槐¹

(¹电子科技大学光纤传感和通信教育部重点实验室, 四川 成都 610054)
²重庆大学光技术与系统教育部重点实验室, 重庆 400044)

摘要 通过电场传输理论,结合实验研究深入分析了基于亚波长直径微纳光纤的串、并联双环结构。建立了两种结构的数学模型,结合得到的数学公式利用 Matlab 进行了数据仿真。通过实验,分别得到了两种双环结构谐振腔的实际输出光谱。实验结果与理论仿真取得了较好的吻合。

关键词 光纤光学; 双环环形谐振腔; 微纳光纤; 微纳光纤器件

中图分类号 TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP48.010603

Theory and Experiment Research of Double-Knot Resonators Based on Micro-Fiber

Yang Feiya¹ Wu Yu¹ Rao Yunjiang^{1,2} Chen Yihuai¹

¹Key Laboratory of Broadband Optical Fiber Sensing & Communication,

University of Electronics Science & Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China

²Key Laboratory of Optoelectronic Technology & Systems, Chongqing University, Chongqing 400044, China

Abstract Series and parallel structures of double-knot resonator based on micro-fiber are analyzed by means of electric field transmission theory theoretically and experimentally. The mathematic model of the two structures is established and data simulation is accomplished by composing gotten mathematic formula on Matlab. In the experiment, the practical output spectrum of two double-knot resonators is gotten respectively. The experimental result matches theoretical simulation well.

Key words fiber optics; double-knot resonators; micro-nano fiber; micro-nano fiber device

OCIS codes 060.4005; 140.4780; 060.2320

1 引言

近年来,随着对介观光学和微纳光波导线研究的深入,一种基于亚波长直径的微纳光波导线结构在国内外被大量报道。亚波长直径的微纳光波导线^[1,2](简称微纳光纤)由于具有大比例的倏逝波传输、高非线性、高色散区、强倏逝波耦合、低弯曲损耗等特点,因此,其在微纳光子器件和近场光学传感方面^[3~5]都有着较好的研究价值和应用前景。其中,基于该微纳光纤的环形谐振腔结构,由于具有弯曲损耗小、品质因素高、自由光谱范围和消光比大以及制作工艺相对简单等特点,引起了众多研究者的关注。目前已有文献报道的微纳光纤环形谐振腔具有超过 20 dB 谐振强度,自由光谱范围(FSR)达到 14.9 nm^[6],品质因素 Q 高达 10⁶ 以上^[7]。本文通过电场传输理论分析了基于微纳光纤的串、并联双环环形谐振腔,获得了输出光谱的数学模型,然后结合数据仿真和实验验证了理论分析结果。本文所获得的数据仿真与实验输出光谱揭示了在传感实验中待测环境折射率、微纳光纤折射率、双环腔长差(有效传输距离差)等参数对输出光谱的影响,同时证明了所获得的输出光谱在光纤传感中具有自由光谱范围宽、谐振强度大,波长漂移明显等优点。最后,对该双环环形谐振腔的潜在应用进行了初步探讨。

收稿日期: 2010-09-08; 收到修改稿日期: 2010-09-26

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(60537040)资助课题。

作者简介: 杨飞亚(1986—),男,硕士研究生,主要从事微纳光纤传感方面的研究。E-mail: young23456@163.com

导师简介: 饶云江(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤传感、光纤智能结构、光通信等方面的研究。

E-mail: yjr@uestc.edu.cn (通信联系人)

2 基于微纳光纤串联结构的理论与实验研究

2.1 理论模型

利用电场传输理论,首先进行了串联双环结构的理论研究。图1为微纳光纤串联双环环形谐振腔的结构示意图与显微镜照片。如图1(a)所示,输入光从端口1的输入端单模光纤(SMF)锥形区耦合进入微纳光纤串联双环结构,两个微环之间是通过耦合区两根微纳光纤之间的倏逝波耦合进行光的传输,最后串联双环结构的输出光通过端口4的光纤锥耦合入SMF输出。

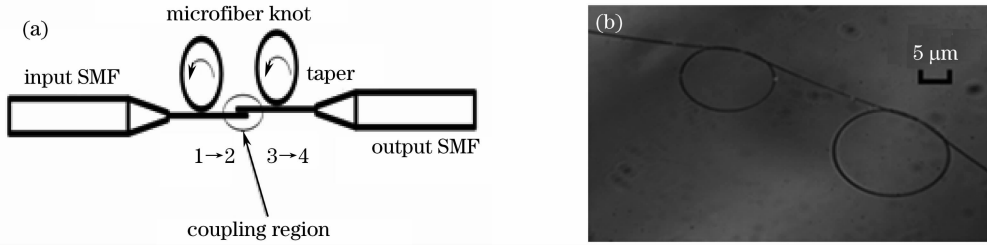


图1 微纳光纤串联双环环形谐振腔。(a)结构示意图,(b)显微镜照片

Fig. 1 Series structure of double-knot resonators. (a) schematic diagram, (b) microscope picture

根据图1(a)所示结构,可以计算出传输光经过第一个微纳光纤环形谐振腔后的输出光谱为^[8~10]

$$E_2 = \left[ja_1 c_1 + \frac{a_1^2 b_1^2 \exp(j\beta L_1)}{1 - a_1 c_1 \exp(j\beta L_1)} \right] \cdot E_1, \quad (1)$$

式中 E_1 为端口1的输入电场, E_2 为端口2的输出电场, β 为微纳光纤的传播常数; $a_1 = (1 - r_1)^{1/2}$,其中 r_1 , r_2 分别为两个微环的耦合损耗; $b_1 = (1 - k_1)^{1/2}$, $c_1 = jk_1^{1/2}$,其中 k_1 为第一个微环的耦合效率; L_1 表示光在第一个微纳光纤环中的有效传输长度, $L_1 = L \cdot n_1$,其中 n_1 为第一个微纳光纤环的相对折射率。

传输光从第一个微环输出后,经过一段 L_{23} 长度的微纳光纤,再进入第二个微环谐振腔,其输出谐振光谱可以表示为

$$E_4 = \exp(j\beta L_{23}) \left[ja_1 c_1 + \frac{a_1^2 b_1^2 \exp(j\beta L_1)}{1 - a_1 c_1 \exp(j\beta L_1)} \right] \left[ja_2 c_2 + \frac{a_2^2 b_2^2 \exp(j\beta L_2)}{1 - a_2 c_2 \exp(j\beta L_2)} \right] \cdot E_1, \quad (2)$$

式中 E_4 为端口4的输出电场, β 为微纳光纤的传播常数; $a_2 = (1 - r_2)^{1/2}$,其中 r_1 , r_2 分别为两个微环的耦合损耗; $b_2 = (1 - k_2)^{1/2}$, $c_2 = jk_2^{1/2}$,其中 k_2 为第二个微环的耦合效率; L_2 表示光在第二个微纳光纤环中的有效传输长度, $L_2 = L \cdot n_2$,其中 n_2 为第二个微纳光纤环的相对折射率。

2.2 数据仿真与实验研究

根据上述理论分析得出的(1)式和(2)式,建立了数据仿真模型,对该串联结构双环环形谐振腔的理论输出光谱进行了数据仿真。设相应的结构参数分别为: $r_1 = r_2 = 0.1$, $k_1 = 0.8$, $k_2 = 0.3$,周围环境为空气 $n_1 = 1$,光纤折射率为 $n_2 = 1.45$,微纳光纤的直径为 $1 \mu\text{m}$ 。两次仿真中微环的大小分别为 $L_1 = L_2 = 500 \mu\text{m}$ 和 $L_1 = 500 \mu\text{m}$, $L_2 = 510 \mu\text{m}$ 。仿真得出的串联双环结构理论输出光谱如图2(a)所示。当 $\Delta L = 0$ 时,输出为梳状的谐振光谱,耦合系数 k 决定谐振强度,微环周长 L 决定了FSR;当 $\Delta L = 10 \mu\text{m}$ (即两个微环具有一定的有效传输长度差),在谐振输出的FRS将会产生一个二阶的谐振峰。

由于温度、应变、外界环境折射率的变化会造成光在两环中的有效传输长度 ΔL 发生改变,根据(1)式和(2)式,可以计算出一阶、二阶谐振峰的位置会发生漂移。通过设置不同的参数,进行了大量的数据仿真得出, ΔL 增大时,二阶谐振峰会在一阶谐振峰的自由光谱范围内向长波方向漂移。通过分析漂移量的线性度,发现所获得的波长漂移线性度达0.9957,可用于温度、折射率传感实验。

实验所使用的微纳光纤是通过高温热熔拉伸的方式制备的,通过该方法制备的微纳光纤直径可以达到 $1 \mu\text{m}$,长度达到8 cm以上。利用光纤锥作为操作的微探针,在显微镜下通过微探针操纵微光纤,将其可自由移动的一端扭结,制成半径约为几毫米的环,通过拉伸光纤环的两端逐渐减小环的半径,直到获得需要大小(直径为数十微米至数百微米)的微环,利用同样的方法在另一根微纳光纤上制备出相同的微环。两个微纳光纤环的一端分别通过光纤锥形区与普通SMF连接,两个微环之间的微纳光纤是通过静电力和范德瓦耳力吸附在一起[如图1(a)耦合区所示],利用倏逝波耦合的方式进行光的传输。其中,一端SMF作为光源

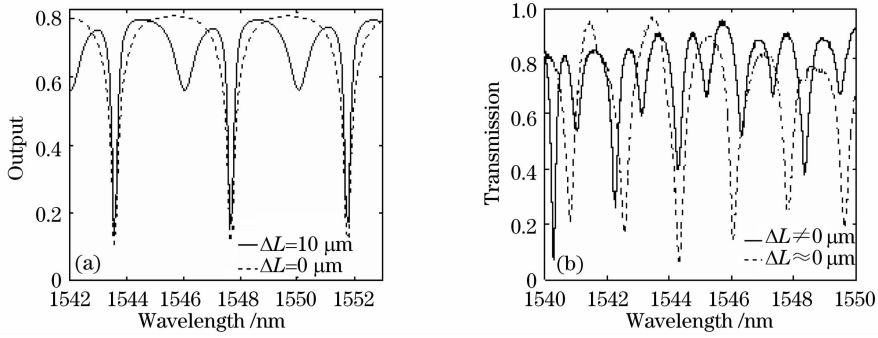


图2 微纳光纤串联双环型谐振腔在不同有效光传输长度。(a) 理论输出光谱, (b) 实验输出光谱

Fig. 2 Series structure of double-knot resonators under different effective optical path lengths.

(a) theoretical spectrum, (b) experimental spectrum

的输入端,另一端 SMF 作为输出端与检测的光学仪器相连接。

实验测得该串联双环结构的实际输出光谱如图 2(b)所示。其中虚线表示两个微环有效传输长度相同时的输出光谱,实线为两个微环有效传输长度不相同时的输出光谱。可以看出,除了输出光功率有一定偏差之外,实际输出光谱与理论仿真得到的谱图[图 2(a)]基本吻合,这说明了上述基于微纳光纤串联双环结构的理论分析与数据仿真是正确的。当两个微环所处环境的温度、湿度、折射率等参数发生变化时,将会引起微纳光纤环的有效折射率发生变化,从而改变光在微环中传输时的有效传输长度,引起相应谐振波长的漂移。通过测量一阶、二阶谐振波长的漂移,可得出对应微环周围环境参数的改变量,因此利用这种结构可以实现对双环所分布区域内环境参数变化的实时传感与检测,也可应用于微观尺度下温度、折射率、湿度等多参数准分布式测量。

3 并联双环结构的理论与实验研究

3.1 理论模型

针对基于微纳光纤的并联双环型谐振腔结构,同样从理论和实验两方面进行了讨论和研究。图 3 为微纳光纤并联双环型谐振腔的结构示意图与显微镜照片。如图 3(a)所示,输入光从端口 1 进入双环并联结构,经过微环耦合区分别进入端口 3 和 4,进入端口 3 的光还将通过端口 5 进入一个并联的微环谐振腔,最后再通过耦合区从端口 4 输出。

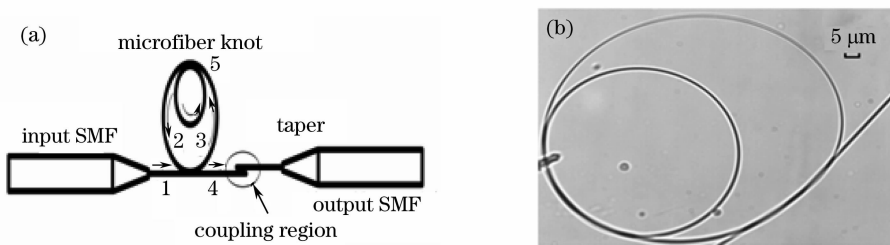


图3 微纳光纤并联双环型谐振腔。(a) 结构示意图, (b) 显微镜照片

Fig. 3 Parallel structure of double-knot resonators. (a) schematic diagram, (b) microscope picture

根据上述结构,可以计算出输出端口 3 和 4 的电场传输方程分别为

$$E_2 = \frac{\sqrt{(1-r_a)(1-k_a)}}{1-j\sqrt{k_a(1-r_a)}\left[j\sqrt{k_b(1-r_b)} + \frac{(1-k_b)(1-r_b)\exp(j\beta L_b)}{1-j\sqrt{k_b(1-r_b)}\exp(j\beta L_b)}\right]\exp(j\beta L_a)} E_b, \quad (3)$$

$$E_4 = \left\{ j\sqrt{k_a(1-r_a)} + \frac{\sqrt{(1-r_a)(1-k_a)}\left[j\sqrt{k_b(1-r_b)} + \frac{(1-k_b)(1-r_b)\exp(j\beta L_b)}{1-j\sqrt{k_b(1-r_b)}\exp(j\beta L_b)}\right]\exp(j\beta L_a)}{1-j\sqrt{k_a(1-r_a)}\left[j\sqrt{k_b(1-r_b)} + \frac{(1-k_b)(1-r_b)\exp(j\beta L_b)}{1-j\sqrt{k_b(1-r_b)}\exp(j\beta L_b)}\right]\exp(j\beta L_a)} \right\} E_b, \quad (4)$$

式中 r_a 和 r_b , k_a 和 k_b 分别为大环和小环的耦合损耗系数以及耦合效率,大环的周长为 L_a ,小环的周长为 L_b 。

3.2 数据仿真与实验研究

结合上述的理论分析得到(3)式和(4)式,进行了数据仿真。设参数分别为: $r_a=r_b=0.1$, $k_a=k_b=0.8$,大环周长 $L_a=1000\ \mu\text{m}$,小环周长 $L_b=500\ \mu\text{m}$,周围环境为空气 $n_1=1$,光纤折射率为 $n_2=1.45$,微纳光纤的直径为 $1\ \mu\text{m}$ 。仿真得出并联双环谐振腔的输出光谱如图 4(a)所示。

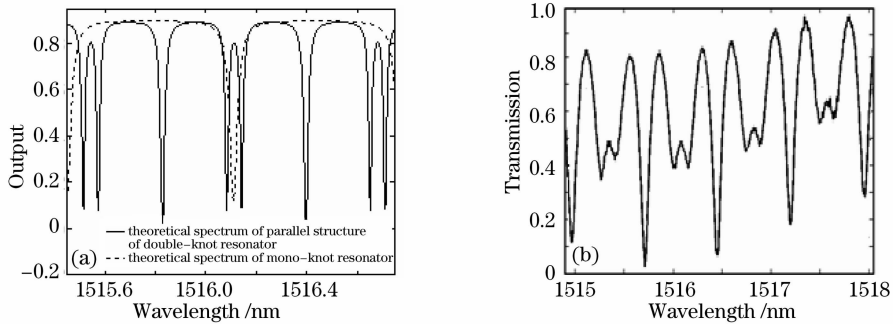


图 4 微纳光纤并联双环环形型谐振腔。(a) 理论输出光谱,(b) 实验输出光谱

Fig. 4 Parallel structure of double-knot resonators. (a) theoretical spectrum, (b) experimental spectrum

为方便分析并联双环结构输出光谱特性,在理论仿真数据中加入了微纳光纤单环谐振腔的理论输出光谱。从图 4(a)中可以看到,单环输出光谱在 $1516.05\ \text{nm}$ 附近有一个非常明显的谐振峰,其透射率小于 0.05 [图 4(a)虚线所示]。但是在并联双环耦合谐振腔中,由于小环和大环中两路光的相位相反,发生相消干涉,使得双环耦合谐振腔对 $1516.05\ \text{nm}$ 处的光场透射率达到了 0.8 左右,据此可以得出,在并联双环结构中产生了类似电磁诱导透明(EIT)效应^[11]。通过大量数据仿真得出,输出光谱在谐振峰位置的光场透射率与两微环的耦合效率密切相关,减小大环的半径可以使自由光谱区变宽,出现类 EIT 效应的波段会同时发生移动^[12]。

实验通过将微纳光纤可自由移动的一段扭结制成半径约为几毫米的环,通过拉伸光纤环的两端逐渐减小环的半径,然后用同样的方法再次扭结,制得如图 3(b)所示的并联双环环形型谐振腔。微纳光纤环的一端通过光纤锥形区与普通 SMF 连接,另一端与一根接收光的微纳光纤吸附在一起[如图 3(a)耦合区所示],同样通过倏逝波耦合的方式进行光的传输。其中,一端 SMF 作为光源的输入端,而另一端 SMF 作为输出端与检测的光学仪器相连接。

通过实验得到了并联双环谐振腔的实际输出光谱,如图 4(b)所示。可以看出,实验输出光谱在 1515.3 , 1516.2 , 1516.9 以及 $1517.6\ \text{nm}$ 左右波谷位置的光场透射率均上升了约 $2\ \text{dB}$,证明了实验中出现了较明显的类 EIT 效应。研究发现,通过控制大环的半径可以实现类 EIT 谐振峰的移动,即可以实现频率可调的类 EIT 效应。此种结构可以用于进一步研究非线性效应以及快光、慢光等现象^[13],为制备高集成度小尺度的激光器、光滤波器^[14,15]以及传感器^[16]提供了新的思路。

4 结 论

本文对基于微纳光纤的串、并联双环环形型谐振腔输出光谱进行了理论计算和数据仿真,得到了两种结构的理论输出光谱。结合理论分析,实验得到的实际输出光谱与理论仿真具有很好的一致性。所研究的微纳光纤环具有低弯曲损耗、高消光比、高 Q 值等特点,可以实现各种复合结构的高精细度微环谐振腔结构。这种基于微纳光纤双环环形谐振腔可以应用于微观尺度下多参数准分布式测量,同时在新型的微纳光子器件领域有着较好的研究价值和应用前景。

参 考 文 献

- 1 Tong Limin, Pan Xinyun. Subwavelength-diameter optical fibers: waveguiding properties and photonic applications[J]. *Physics*, 2007, **36**(8): 626~629

- 童利民,潘欣云. 亚波长直径光纤的光学传输特性及其应用[J]. 物理, 2007, **36**(8): 626~629
- 2 Tian Feng, Yang Guoguang, Bai Jian. Direct writing of submicron lines using the micro- and nanofiber pens[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 206~209
- 田 丰,杨国光,白 剑. 亚微米线条的微纳光纤笔直写技术研究[J]. 光学学报, 2010, **30**(1): 206~209
- 3 Zuguang Guan, Sailing He. Coherence multiplexing system based on asymmetric Mach-Zehnder interferometers for Faraday sensors[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(23): 1907~1909
- 4 Xiaoshun Jiang, Qing Yang, Guillaume Vienne *et al.*. Demonstration of microfiber knot laser[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **89**(14): 143~153
- 5 Tong Limin, Lou Jingyi. Nanofiber sensors[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2005, **42**(12): 29~30
- 童利民,楼静漪. 纳米光纤传感器[J]. 激光与光子学进展, 2005, **42**(12): 29~30
- 6 Xiaoshun Jiang, Yuan Chen, Guillaume Vienne *et al.*. All-fiber add-drop filters based on microfiber knot resonators[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(12): 1710~1712
- 7 Daoxin Dai, Sailing He. Highly sensitive sensor based on an ultra-high-Q Mach-Zehnder interferometer-coupled microring [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2009, **26**(3): 511~516
- 8 M. Sumetsky. How thin can a microfiber be and still guide light? [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(7): 870~872
- 9 L. F. Stokes, M. Chodorow, H. J. Shaw. All-single-mode fiber resonator[J]. *Opt. Lett.*, 1982, **7**(6): 288~290
- 10 M. Sumetsky, Y. Dulashko, J. M. Fini *et al.*. The microfiber loop resonator: theory, experiment, and application[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(1): 242~249
- 11 K. -J. Boller, A. Imamoglu, S. E. Harris. Observation of electromagnetically induced transparency[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1991, **66**(20): 2593~2596
- 12 Li Xiyuan, Fu Jian, Tong Limin. Electromagnetically-induced-transparency-like effect based on micro-fiber resonator[C]. 2008 Conference of Chinese Optical Society, Quanzhou, 2008
- 李西远,符 建,童利民. 基于微纳光纤耦合谐振腔的类 EIT 效应[C]. 中国光学学会 2008 年年会, 泉州, 2008
- 13 Yang Lijun. The study on Electromagnetically Induced Transparency (EIT) and Its Nonlinear Behaviors[D]. Baoding: Hebei University, 2007
- 杨丽君. 电磁诱导透明及其非线性特性研究[D]. 保定: 河北大学, 2007
- 14 Ning Ding, Huang Bangcai, Li Chaohui *et al.*. Ring cavity Yb^{3+} -doped fiber laser with frequency selecting by fiber Bragg grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(2): 190~194
- 宁 鼎,黄榜才,李朝辉 等. 光纤光栅选频环形腔掺 Yb^{3+} 光纤激光器[J]. 光学学报, 2004, **24**(2): 190~194
- 15 Chen Wei, Zhang Yan, Ren Min *et al.*. Experimental study of single-longitudinal-mode Brillouin erbium-doped fiber laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1740~1744
- 陈 伟,张 艳,任 民. 单纵模布里渊掺铒光纤激光器的实验研究[J]. 光学学报, 2008, **28**(9): 1740~1744
- 16 Luo Xiaodong, Rao Yunjiang, Ran Zenling. 100 km fiber Bragg grating sensor system based on fiber ring laser and optical amplification[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(8): 1393~1396
- 罗小东,饶云江,冉曾令. 基于光纤环形激光器和光放大的 100 km 光纤布拉格光栅传感系统[J]. 光学学报, 2007, **27**(8): 1393~1396