

doi: 10.3788/gzxb20164511.1106005

双锥型光纤布喇格光栅光谱特性

赵洪霞, 程培红, 丁志群, 鲍吉龙, 蒋鹏, 李银杰

(宁波工程学院 电子与信息工程学院, 浙江 宁波 315016)

摘 要: 利用传输矩阵法和有限元法分析了光栅周期、调制深度、锥腰直径和不同设计区段长度比等光栅制作参量和结构设计参量对双锥型光纤布喇格光栅光谱特性的影响. 软件仿真结果表明: 限定相关参量后, 光栅周期增大, 双锥型光纤布喇格光栅整体反射谱右移, 与均匀分布光纤布喇格光栅光谱变化规律一致; 调制深度增强, 两主反射峰基本不变, 而两主反射峰中间的次级峰个数增多, 光强增大; 锥腰直径减小, 激发更多包层模, 干涉峰个数增多, 强度提升; 整根光栅长度保持 1 cm 不变, 锥腰区, 标准光栅区和渐变光栅区长度比直接影响次级峰的数量和幅值, 随着渐变光栅区长度占比的增大, 次级峰的幅值增大, 同时个数减少. 双锥型光纤布喇格光栅可在多参量传感器、多通道滤波器、多通道半导体激光器、色散补偿和光上下载分插复用等方面广泛应用.

关键词: 光纤光学; 双锥型 FBG; 光栅周期; 调制深度; 锥腰直径; 不同区段长度比

中图分类号: TN29

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)11-1106005-6

Optical-spectrum Characteristics of a Biconical Fiber Bragg Grating

ZHAO Hong-xia, CHENG Pei-hong, DING Zhi-qun, BAO Ji-long, JIANG Peng, LI Yin-jie
(Electronic and Information Engineering College, Ningbo University of Technology,
Ningbo, Zhejiang 315016, China)

Abstract: Using transfer matrix method and finite element method, the influences of fabrication and structure factors, such as grating period, modulation depth, diameter of waist and length ratio in different regions, on the spectral characteristics of the biconical fiber Bragg grating were analyzed. The simulation results demonstrate that when other grating factors remain unchanged, the reflection spectrum of the biconical fiber Bragg grating red-shifts with the increasing of grating period. This change trend is in accord with that of the uniform fiber Bragg grating. However, when the modulation depth is enhanced, the two main peaks does not shift, but the number of secondary peaks between the two main peaks increases and intensity is enhanced. Moreover, with the decrease of the cone waist diameter, more cladding modes are excited, and more interference peaks with enhanced intensity are observed. When the grating length is kept at 1 cm, the length ratios between waist region, standard grating region and gradient grating region will impact the number and the amplitude of the secondary peaks directly. With the increase of the gradient grating region length, the number of secondary peak decreases but the amplitude increases. In a word, by properly designing the grating factors, the biconical fiber Bragg grating can be widely used in multi-parameter sensors, multi-channel filters, multi-channel semiconductor laser, dispersion compensation and OADM.

Key words: Fiber optics; Biconical fiber Bragg grating; Grating period; Modulation depth; Diameter of waist; Different region length ratio

OCIS Codes: 060.3735; 060.2370; 280.0280

基金项目: 浙江省自然科学基金(No. Q14A040006)和宁波市自然科学基金(Nos. 2015A610115, 2015A610081)资助

第一作者: 赵洪霞(1970-), 女, 副教授, 硕士, 主要研究方向为光纤光栅传感技术. Email: zhx-1228@163.com

收稿日期: 2016-05-03; 录用日期: 2016-06-28

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

光纤多参量传感器体积小、重量轻、可同时对多个参量敏感,在耐腐蚀、耐高温等特殊环境中具有应用价值和前景.已报道的光纤多参量传感器分为三类:1)多器件组合法^[1-3];2)特殊光纤写制单光纤布喇格光栅法^[4-5];3)不同结构光纤对接干涉仪法^[6-8].多器件组合法需要两个或两个以上传感器的组合,传感系统结构复杂、体积大,连接损耗增高,同时成本较高;特殊材料写制单FBG法能够同时满足微型化和同步实现多个参量测量的要求,但刻录系统复杂,成本过高,不具普适性;不同结构光纤对接干涉仪法由于干涉谱带宽普遍较宽,测量灵敏度不高.体积小、成本低廉、易于制作、高传感灵敏度,实用性强的多参量光纤传感器的设计和开发日益受到关注,有关这方面的研究和探索亟待进一步深入研究.

随着光电子器件智能化和微型化的发展,锥形光纤成为科研人员的研究热点^[9-12].大量研究证明,当过渡区长度比较短时,锥形光纤模场会产生多模干涉,锥腰部分形成周期性的光强分布,在微型多参量传感器,多通道滤波器、多通道半导体激光器、色散补偿和光上下载分插复用等方面具有广泛应用.受模场直径的影响,振荡光谱带宽达微米量级,根本无法满足实际需要.光纤布喇格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)是一种超强波长选择器件^[13],具有亚纳米带宽.锥形光纤技术与光纤布喇格光栅技术有效结合,使基于全光纤材料的窄带多振荡谱成为可能.

本文提出一种双锥型FBG设计,反射谱出现多个

窄带谐振峰.利用传输矩阵法和有限元法分析了光栅周期、调制深度、锥腰直径和不同设计区段长度比对双锥型FBG光谱特性的影响,为双锥型FBG的优化设计和实验制作提供理论指导和技术参考.

1 双锥型光纤布喇格光栅结构模型

本文提出的可产生多个窄带谐振峰的双锥型FBG结构如图1.整个光栅区分成对称的五段, L_1 :锥腰区,

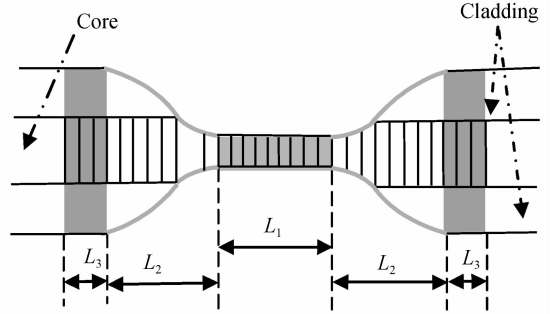


图1 双锥型光纤布喇格光栅结构模型

Fig. 1 Structural model of the biconical FBG

光栅只有芯层,包层为栅区外环境; L_2 :渐变光栅区,对称分布于锥腰区两侧,柱形结构直径呈渐变分布; L_3 :标准光栅区,对称分布于过渡区两侧,由标准纤芯和包层组成.

2 理论分析

2.1 双锥型FBG传输反射率

根据模式耦合理论,长为 L 的FBG可用传输矩阵 T_K 表示^[14-15]

$$T_K = \begin{pmatrix} \cosh(\Omega L) - i \frac{\zeta}{\Omega} \sinh(\Omega L) & -i \frac{K}{\Omega} \sinh(\Omega L) \\ i \frac{K}{\Omega} \sinh(\Omega L) & \cosh(\Omega L) + i \frac{\zeta}{\Omega} \sinh(\Omega L) \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中, $\Omega = \sqrt{K^2 - \zeta^2}$, $\zeta = \beta - \frac{\pi}{\Lambda}$, $K = \frac{\pi \delta n}{\lambda}$, $\beta = \frac{2\pi}{\lambda} n_{\text{eff}}$, δn 为调制深度, K 为耦合系数, Λ 为光栅周期, n_{eff} 为纤芯有效折射率.

按图1所示的结构,双锥型FBG可等效为标准光栅区,渐变光栅区及锥腰区从左到右顺次级联.采用传输矩阵法得到纤芯基模经过整个光栅区后的电场幅度为

$$\begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} = T_K(L_3, n_{3\text{eff}}) T_M(L_2) T_K(L_1, n_{1\text{eff}}) \cdot T_M(L_2) T_K(L_3, n_{3\text{eff}}) \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中 A 和 B 分别表示模场沿正向和反向缓慢变化的幅度; $T_M(L_2)$ 是采用传输矩阵法均匀分段得到的渐变

光栅区总矩阵的表达式

$$T_M(L_2) = T_M T_{M-1} \cdots T_L \cdots T_1 \begin{bmatrix} A_0 \\ B_0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中, A_0 和 B_0 分别表示模场沿正向和反向缓慢变化的初始边界条件.

2.2 双锥型FBG各区段纤芯有效折射率的计算

由式(1)可知,光栅的传输矩阵在调制深度、耦合系数及光栅周期已知的条件下,与纤芯有效折射率密切相关.由于整个光栅各区段结构不同,有效折射率的计算方式各异.

标准光栅段纤芯有效折射率由表征单模弱导光纤纤芯基模有效折射率的色散方程求得^[16],即

$$V \sqrt{1-b} \frac{J_1(V \sqrt{1-b})}{J_0(V \sqrt{1-b})} = V \sqrt{b} \frac{N_1(V \sqrt{b})}{N_0(V \sqrt{b})} \quad (4)$$

式中, J_0 和 J_1 是 0 阶和 1 阶第一类 Bessel 函数; N_0 和 N_1 是 0 阶和 1 阶修正的第二类 Bessel 函数; $V = \left(\frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_0^2 - n_1^2}\right)$ 表示归一化频率; $b = (n_{\text{eff}}^2 - n_1^2) / (n_0^2 - n_1^2)$ 表示模式的归一化有效折射率. 式中 a , n_0 和 n_1 分别为纤芯半径、纤芯材料折射率和包层材料折射率.

由式(4)可知, 纤芯和包层材料折射率确定的条件下, 标准光栅段纤芯有效折射率与纤芯半径和入射光波长有关; 而标准光栅区纤芯半径不变, 所以纤芯有效折射率仅是入射光波长的函数.

锥腰区光栅由于只有纤芯, 直径仅为几个微米或亚微米, 包层为外界环境. 根据光纤波导理论, 满足单模微纳光纤基模有效折射率的条件, 即^[17]

$$n_{\text{eff}}^2 = n_0^2 - \left(\frac{U}{V}\right)^2 (n_0^2 - n_1^2) \quad (5)$$

式中 $U = a \sqrt{k_0^2 n_0^2 - \beta^2}$ 为横向传播常量, 同时 U 和 V 满足光纤 LP 模式的本征方程, 即

$$\begin{cases} \frac{U J_{m-1}(U)}{J_m(U)} = -\frac{W K_{m-1}(W)}{K_m(W)} \\ U^2 + W^2 = V^2 \end{cases}$$

式中 β 和 k_0 分别为传播常量和真空中的波数.

由式(5)可知, 当纤芯折射率和入射光波长一定时, 锥腰区 FBG 纤芯基模有效折射率与纤芯半径密切相关.

由图 1 可知, 渐变光栅区结构复杂, 有效折射率没有固定的计算公式, 本文采用有限元法计算.

根据麦克斯韦方程, 阶跃单模石英光纤的本征值方程为

$$\nabla^2 \Phi = (\beta^2 - k_0^2 n^2) \Phi \quad (6)$$

利用有限元法将渐变光栅区单元化, 由式(6)得特征值方程为

$$(C - \beta^2 D) \Phi = 0 \quad (7)$$

式中, C 和 D 是稀疏矩阵. 求出特性值 β , 再由 $\beta = \frac{2\pi}{\lambda} n_{\text{eff}}$ 求出相应的有效折射率.

3 值模拟与结果分析

根据式(2), 利用 Matlab2007 软件编程对此双锥型 FBG 光谱特性进行数值仿真. 图 2 为理论模拟得到设计光栅的反射谱, 其中有关参量为: $n_0 = 1.458$; $n_1 = 1.45$; 标准光栅区纤芯半径 $a = 4.15 \mu\text{m}$; 包层半径为 $62.5 \mu\text{m}$; 整个光栅长度为 1 cm , $L_3 : L_2 : L_1 = 4.5 : 4.5 : 1$; 锥腰区纤芯直径为 $3 \mu\text{m}$; 调制深度为 $\delta n = 0.5 \times 10^{-3}$; 过渡区光栅直径分布如图 3, 其中各点是把相位掩膜法制得的普通单模 FBG 在 HF 酸溶液中腐蚀 2 h, 在荧光显微镜下测得的结果, 横轴以均匀腐蚀

段中心为原点. 显微镜显示的双锥型布喇格光纤光栅形貌如图 4.

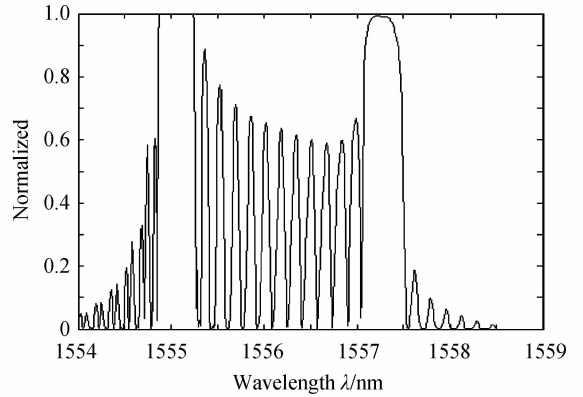


图 2 双锥型 FBG 反射谱

Fig. 2 Reflection spectra of the biconical FBG

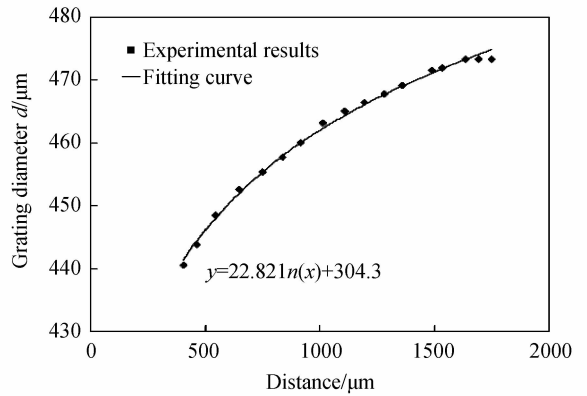


图 3 渐变光栅区形状曲线

Fig. 3 Plot of gradient grating region diameter

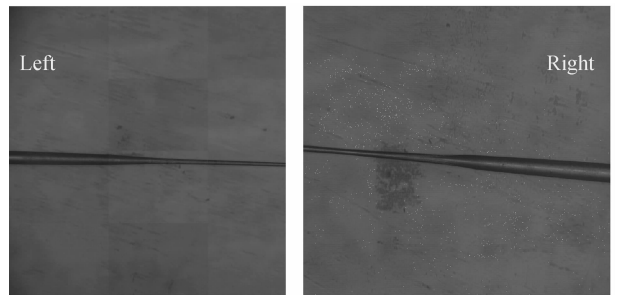


图 4 双锥型 FBG 形貌

Fig. 4 Topography of the biconical FBG

图 2 中, 双锥型 FBG 的反射谱由多个谐振峰构成, 带宽可达亚纳米量级. 其中两个主反射峰是两个标准光栅区所在光栅形成的, 两个主反射峰之间的多个次峰是渐变光栅区在直径逐渐减小的过程中, 芯模模场直径变大, 激发多个包层模, 形成多模干涉的结果. 而两个主峰两侧的振荡峰是光栅两端折射率调制突变形成的旁瓣.

对双锥型结构 FBG 理论建模, 分析该结构 FBG 反射谱与光栅周期、调制深度、锥腰直径、及各区段光栅长度比等的关系.

图 5 是只改变光栅周期得到的设计光栅反射谱.

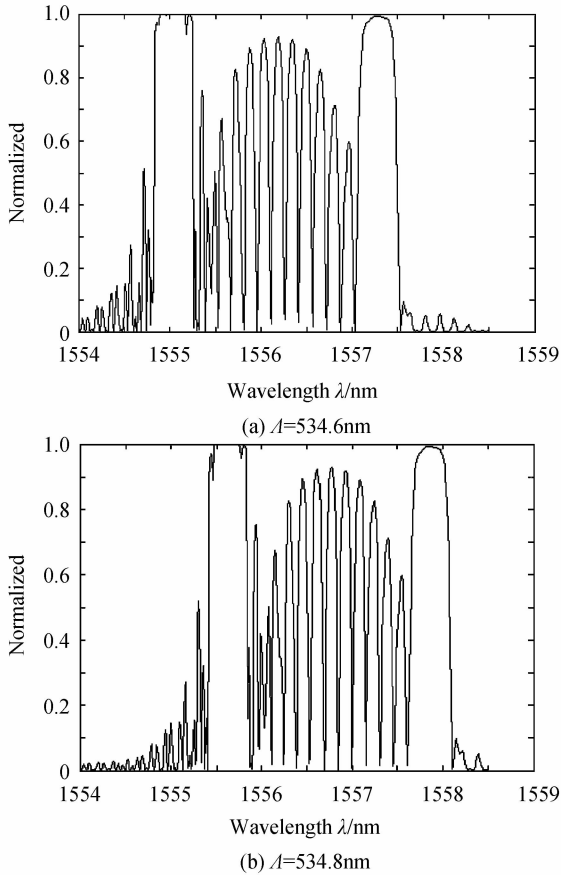


图 5 不同光栅周期下双锥型 FBG 反射谱
Fig. 5 Reflection spectra of the biconical FBG with different grating period

由图 5 可知,在其它条件不变的情况下,随着光栅周期的增大,双锥型 FBG 反射谱整体右移.光栅周期增大 0.2 nm,反射谱右移 0.57 nm.在其它条件不变的情况下,相当于纤芯有效折射率恒定,由式 $\lambda_B = 2\Delta n_{\text{eff}}$ 可知,改变周期,只改变整个光谱的中心波长.

当光栅周期 $\Delta = 534.6$ nm 时,不同调制深度下,双锥型 FBG 反射谱如图 6.

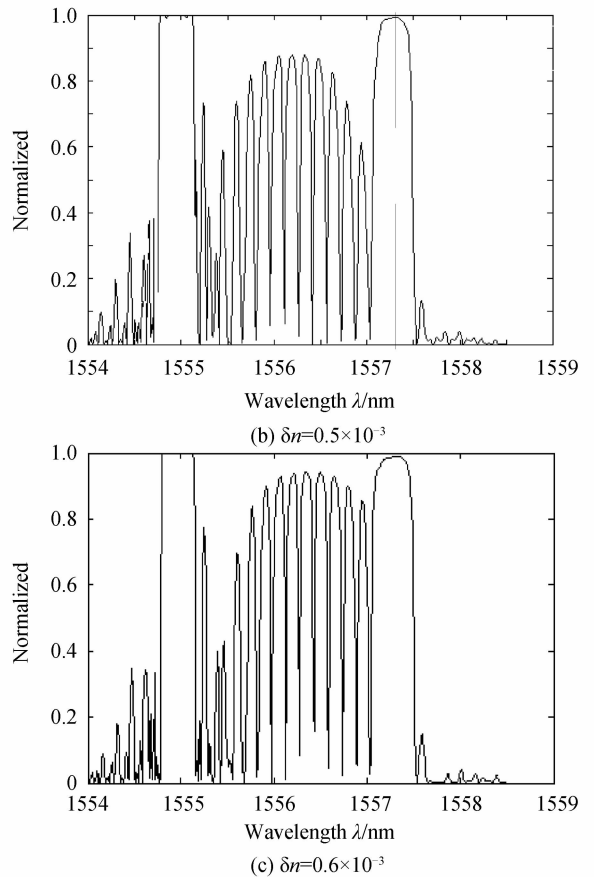
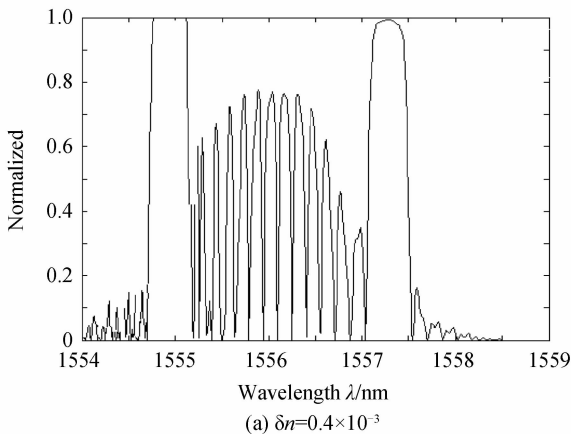


图 6 不同调制深度下双锥型 FBG 反射谱
Fig. 6 Reflection spectra of the biconical FBG with different modulation depth

由图 6 可知,随着调制深度的增强,次级反射峰的个数增多,同时次级反射峰的强度整体增大.当调制深度为 0.4×10^{-3} 时,有 10 个次级峰,而调制深度增大到 0.6×10^{-3} 时,次峰的个数增加到 12 个.由于调制深度增强,耦合系数增大,激发更多包层模.

图 7 是光栅调制深度为 0.5×10^{-3} ,光栅周期 $\Delta = 534.6$ nm 的条件下,锥腰区,标准光栅区和渐变光栅区不同长度比例情况下,双锥型 FBG 反射谱.

由图 7 可知,在光栅整体长度保持 1 cm 不变的条件下,锥腰区,标准光栅区和渐变光栅区的长度比直接影响次级反射峰响应.随着渐变光栅区长度占比的增大,次级峰的幅值增大,次级峰数量减少;当渐变光栅区长度增大一定值后,中间次峰有明显的交联趋势.与文献[18]的分析结果一致.

图 8 是光栅调制深度为 0.5×10^{-3} ,光栅周期 $\Delta = 534.6$ nm,锥腰区,标准光栅区和渐变光栅区长度比为 4.8 : 4.8 : 0.4,不同锥腰直径情况下,双锥型 FBG 反射谱.

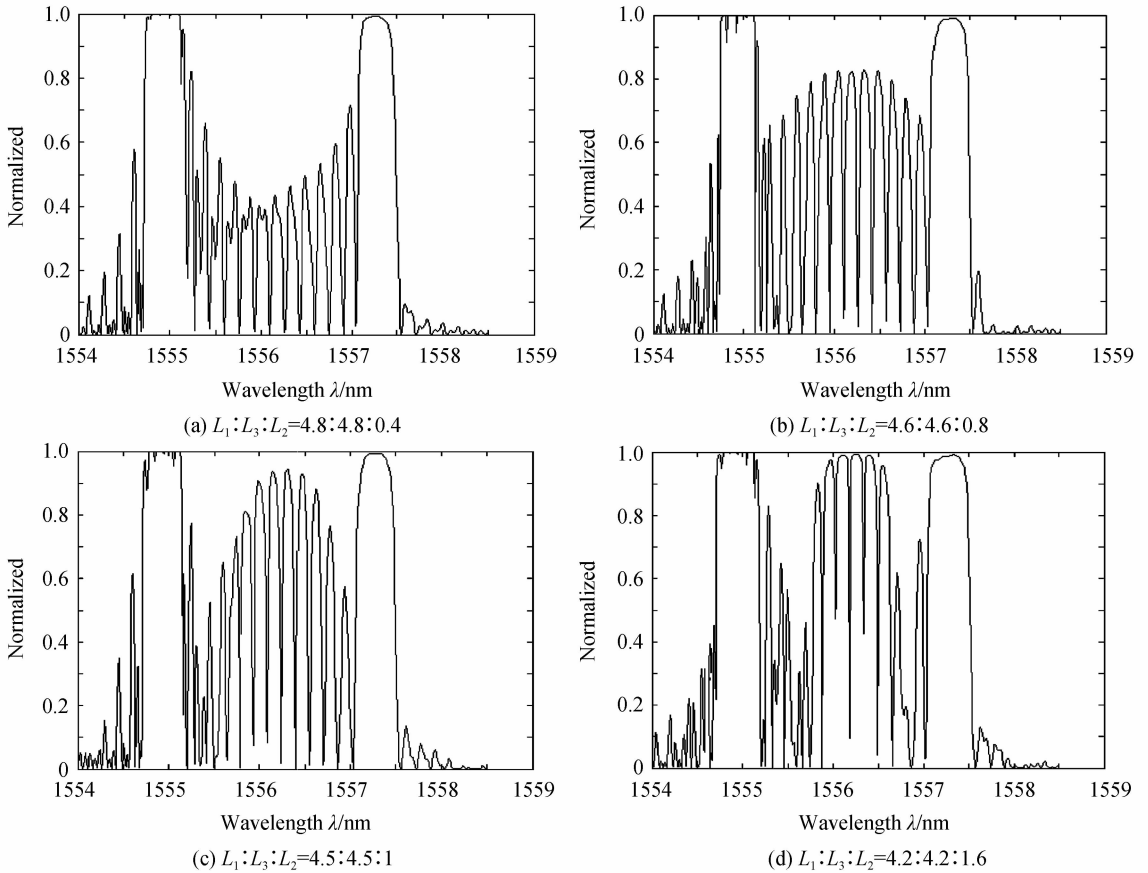


图 7 不同光栅各区段长度占比情况下双锥型 FBG 反射谱

Fig. 7 Reflection spectra of the biconical FBG with different the length ratio of different regions

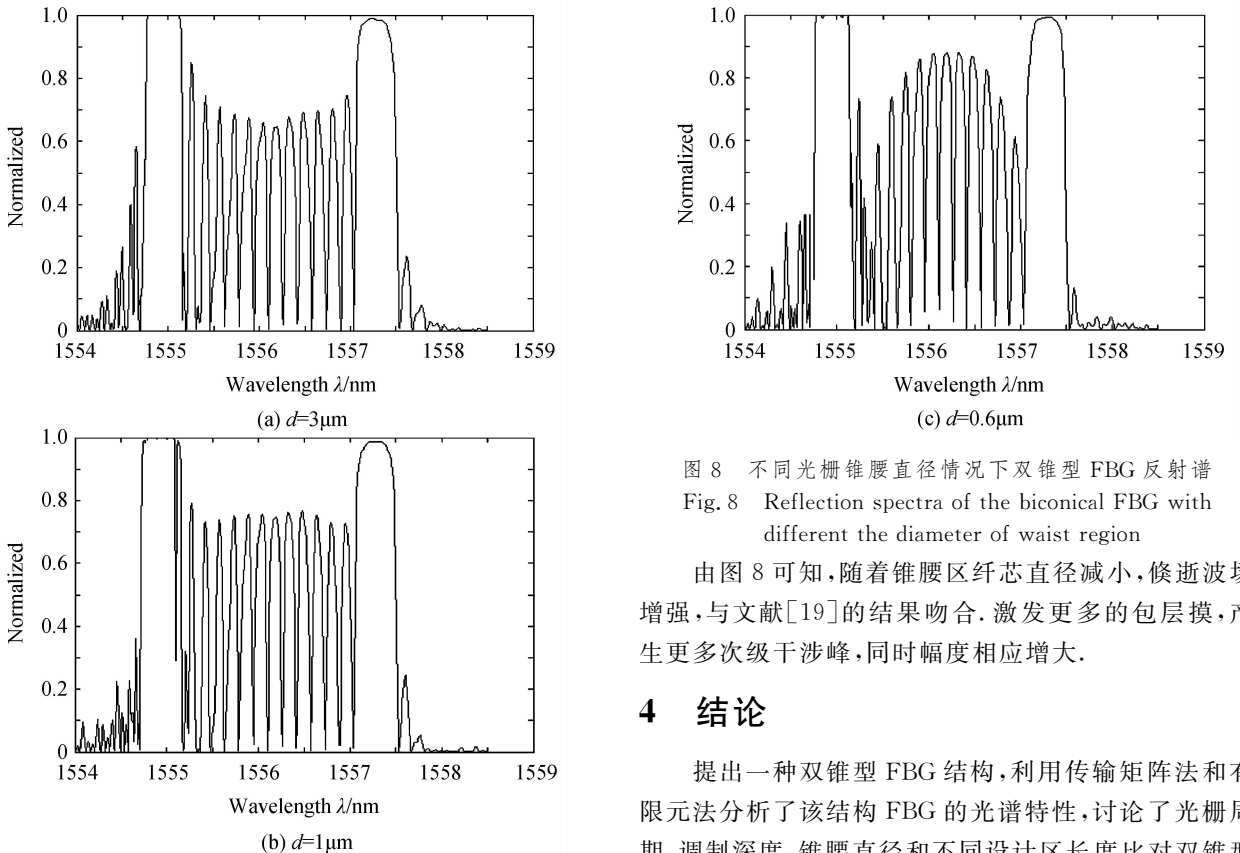


图 8 不同光栅锥腰直径情况下双锥型 FBG 反射谱
Fig. 8 Reflection spectra of the biconical FBG with different the diameter of waist region

由图 8 可知, 随着锥腰区纤芯直径减小, 倏逝波场增强, 与文献[19]的结果吻合. 激发更多的包层模, 产生更多次级干涉峰, 同时幅度相应增大.

4 结论

提出一种双锥型 FBG 结构, 利用传输矩阵法和有限元法分析了该结构 FBG 的光谱特性, 讨论了光栅周期、调制深度、锥腰直径和不同设计区长度比对双锥型

FBG 光谱特性的影响. 软件仿真结果证明, 该 FBG 结构反射谱出现两个主反射峰, 多个次反射峰. 利用该结构 FBG 可实现微型多参量传感, 多通道滤波、多通道半导体激光器、色散补偿和光上下载分插复用等.

参考文献

- [1] RAO Y J, HENDERSON P J, JACKSON D A, *et al.* . Simultaneous strain, temperature and vibration measurement using a multiplexed in-fiber-Bragg grating/fiber Fabry-Perot sensor system[J]. *Electronic Letters*, 1997, **33**(24): 2063-2064.
- [2] PAN Cong-lin, HUI Xiao-qiang, ZHANG Pei-mei . Using photonic crystal fiber grating sensor to measure temperature stain and gas concentration simultaneously[J]. *Journal of Applied Optics*, 2013, **34**(2): 374-380.
- [3] ZHAN C, ZHU Y, YIN S Z, *et al.* Multi-parameter harsh environment sensing using a symmetric Bragg gratings inscribed by IRfemtosecond radiation [J]. *Optical Fiber Technology*, 2007, **13**(9): 98-107.
- [4] VILLATORO J, MINKOVICH V P, PRUNERI V, *et al.* Simple all-microstructured-optical-fiber interferometer built via fusion splicing[J]. *Optics Express*, 2007, **15**(4): 1491-1496.
- [5] CHOI H Y, KIM M J, LEE B H. All-fiber Mach-Zehnder type interferometers formed in photonic crystal fiber[J]. *Optics Express*, 2007, **15**(9): 5711-5720.
- [6] LI Y, CHEN L, HARRIS E, *et al.* Double-pass in-line fiber taper Mach-Zehnder interferometer sensor [J]. *Photonics Technology Letters*, 2010, **22**(23): 1750-1752.
- [7] DONG B, HAOE J Z. Core-offset hollow core photonic band gap fiber-based intermodal interferometer for strain and temperature measurements [J]. *Applied Optics*, 2011, **50**(18): 3011-3014.
- [8] TIAN Z B, YAM S H, LOOCK H P. Single-mode fiber refractive index sensor based on core-offset attenuators[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, **20**(16): 1387-1389.
- [9] XUE Chun-rong, HOU Hai-hong. Structure and characteristics of tapered fiber[J]. *Laser & Infrared*, 2007, **37**(9): 882-884.
薛春荣, 侯海虹. 锥形光纤的结构与特性[J]. *激光与红外*, 2007, **37**(9): 882-884.
- [10] GUO Ze-bin, TANG Jun, LIU Jun, *et al.* Optical model reciprocity of disk resonator excited by tapered fiber[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, **63**(22): 227802-1-8.
郭泽彬, 唐军, 刘俊, 等. 锥形光纤激发盘腔光学模式互易性研究[J]. *物理学报*, 2014, **63**(22): 227802-1-8.
- [11] XUE Chun-rong, ZHU Sheng-xiang, XIAO Zhi-gang. Coupling properties between two tapered fiber [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(7): 803-805.
薛春荣, 祝生祥, 肖志刚. 锥形光纤间的耦合特性[J]. *光子学报*, 2004, **33**(7): 803-805.
- [12] YAN Ying-zhan, JI Jie, WANG Bao-hua, *et al.* Evanescent wave excitation of microsphere high Q model using tapered fiber[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, **37**(7): 1789-1793.
严英占, 吉喆, 王宝花, 等. 锥形光纤倏逝场激发微球腔高 Q 模式[J]. *中国激光*, 2010, **37**(7): 1789-1793.
- [13] LIANG Rui-bing, SUN Qi-zhen, YUE Jiang-hai. Theoretical investigation on refractive index sensor based on Bragg grating in micro/nanofiber[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, **60**(10): 104221.
梁瑞冰, 孙琪真, 沃江海. 微纳尺度光纤布喇格光栅折射率传感的理论研究[J]. *物理学报*, 2011, **60**(10): 104221.
- [14] YAMADA M, SAKUDA K. Analysis of almost-periodic distributed feedback slab waveguide via a fundamental matrix approach[J]. *Applied Optics*, 1987, **26**(1): 3474-3478.
- [15] HOU Shang-lin, GE Wei-qing, LIU Yan-jun, *et al.* Investigation on slow light in nonuniform photonic crystal fiber gratings[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2014, **35**(9): 1138-1142.
侯尚林, 葛伟青, 刘延君, 等. 非均匀光子晶体光纤光栅慢光的研究[J]. *发光学报*, 2014, **35**(9): 1138-1142.
- [16] ERDOGAN T. Cladding-mode resonances in short and long period fiber grating filters [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1997, **14**(8): 1760-1773.
- [17] LIAO Yan-biao. Fiber optics [M]. Tsinghua university press, 200.
- [18] XU Ying-ying. Multimode evolution and micromixer application of non-adiabatic microfiber taper [D]. Zhejiang University, 2011.
徐颖颖. 非绝热锥形微纳光纤的多模效应及其在微混合器中的应用[D]. 浙江: 浙江大学, 2011.
- [19] TONG L M, LOU J Y, MAZUR E. Single-mode guiding properties of subwavelength-diameter silica and silicon wire waveguides[J]. *Optics Express*, 2004, **12**(6): 1025-1035.