

文章编号: 0253-2239(2004)09-1189-4

带宽可调的斜边光纤光栅滤波器的设计与制作

黄 锐 瞿荣辉 方祖捷

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要: 基于遗传算法设计了斜边三角形光纤光栅(EFBG)的折射率调制函数;提出了光纤外径沿轴向变化、在拉力下可获得可调谐的斜边三角形光纤光栅;计算分析了该器件多个物理参量对反射光谱的影响。在实验中,采用紫外激光扫描辐照方法,制备了短波边斜边带宽为 0.7 nm、反射率为 96%的斜边三角形光纤光栅;采用程序控制氢氟酸腐蚀方法获得外径从原始 62.5 μm 减小到 45 μm 、在 85 mm 长度内按设计要求变化的光纤光栅。对该光纤光栅施加从 0 到 1.715 N 变化的拉力时,其反射光谱短波边的斜边带宽从 0.7 nm 增加到 2.3 nm,实现了一种带宽大范围可调的斜边光纤光栅。

关键词: 光纤光学; 光纤传感; 斜边滤波器; 光纤光栅; 折射率调制; 腐蚀
中图分类号: TN253 文献标识码: A

Analysis and Fabrication of Tunable Edge Fiber Bragg Grating Filters

Huang Rui Qu Ronghui Fang Zujie

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

(Received 18 July 2003; revised 11 December 2003)

Abstract: The index modulation function of edge fiber Bragg grating (EFBG) is acquired using genetic algorithms synthesizing, and a method for fabricating tunable EFBG by changing the diameter of the fiber along its axis and applying tension to the fiber grating is proposed and testified. The influence of physical parameters of the device on the edge filter's reflection spectrum is analyzed. An EFBG with a bandwidth of 0.7 nm at shorter wavelength side and a peak reflectivity of 96% is fabricated by ultraviolet laser-scanning. The edge bandwidth of the fiber Bragg grating may be adjusted by tension and the edge bandwidth at shorter wavelength side increases from 0.7 nm to 2.3 nm as the tension increased from 0 to 1.715 N.

Key words: fiber optics; fiber sensing; edge filter; fiber Bragg gratings; index modulation; etch

1 引 言

光纤光栅相位板制作技术的出现使得光纤光栅可以大量地生产,大大降低了光纤光栅的制作成本。光信号解调器是光纤光栅传感系统的主要部分,因此寻找一种经济的有效的解调方式成为了研究的热点^[1~11]。斜边滤波器由于在其斜边带宽内,波长反射率和透射率与波长成线性关系,与耦合器或环形器配合使用可以将波长信号转换成光功率信号,这种解调技术具有成本低、响应速度快、灵敏度高等特点。

到目前为止斜边滤波器的制作技术有体光学技术、波分复用耦合器、双锥形光纤滤波器、光纤光栅等技术。在这些技术中,光纤光栅技术具有插入损耗小、斜边带宽大、体积小、易于使用等特点,成为最吸引人、可以实用化的技术。文献^[5,8~10]制作的斜边滤波器的斜边带宽大小均不可调。本文提出了一种斜边带宽大范围可调的光纤光栅斜边滤波器的制作技术,制作的斜边光栅具有斜边线性度好、制作容易、制作成本低等特点。

2 斜边光纤光栅的设计

斜边三角形反射光谱光纤光栅的制作,需要进

E-mail: rhuangcos@mail.siom.ac.cn

收稿日期:2003-07-18;收到修改稿日期:2003-12-11

行逆工程设计,即从光谱要求计算光纤光栅内部的折射率调制分布函数。遗传算法是逆工程设计的一种有效方法。采用遗传算法模拟计算的结果表明:当光栅的折射率调制函数为斜边三角函数,在合适的光栅长度和合适的最大折射率调制幅度下,光栅反射谱的形状是斜边三角形。斜边三角函数数学表达式为

$$f(z) = \begin{cases} \frac{z}{pL}, & z \leq pL \\ \frac{L-z}{(1-p)L}, & z > (1-p)L \end{cases} \quad (1)$$

L 是光栅的长度, z 代表表光栅的位置, p 为表征三角形形状的参量, $0 \leq p \leq 1$ 。

引入折射率调制的线性啁啾,可以增大斜边光纤光栅的斜边带宽。本文设计的光栅长度 L 为 85 mm,啁啾量 C 为 3 nm, p 值为 0.7, 最大折射率调制幅度 dn (即在 p 点的折射率调制幅度) 为 1.5×10^{-4} 。光栅的反射光谱如图 1 所示。

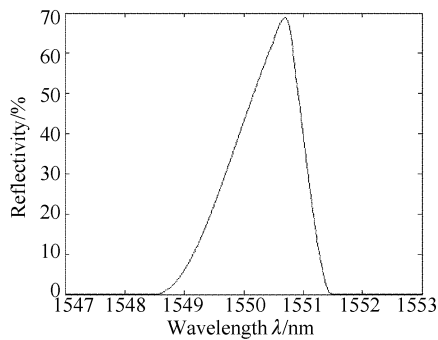


Fig. 1 Reflection spectrum of the EFBG

由图 1 可见,两斜边具有相当好的线性度,斜边光栅短波方向的斜边范围是 1549.0~1550.6 nm,带宽是 1.6 nm。用作光纤光栅传感可解调的应变范围是 0~1333 μm ,可解调的温度范围 0~160 $^{\circ}\text{C}$ 。长波方向的斜边范围是 1550.6~1551.4 nm,带宽是 0.8 nm。图 2 给出了斜边光纤光栅的反射谱随啁啾量 C 的变化,可以看出随着啁啾量 C 的增大,

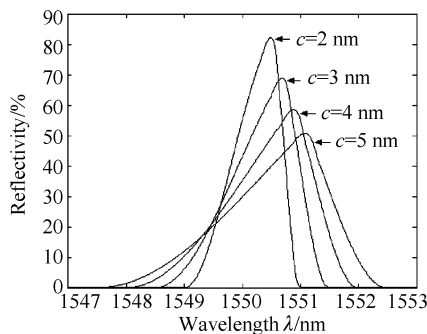


Fig. 2 EFBG spectrum at different chirp

光栅的斜边带宽随之增大,当 C 等于 5 nm 时,短波方向的斜边带宽是 3 nm,长波方向的斜边带宽是 1.4 nm。但光栅的峰值反射率却随着啁啾量 C 的增大而降低,即在相同的光栅长度,相同的最大折射率调制幅度下,光栅斜边带宽的增大是以牺牲峰值反射率为代价的。

3 带宽可调斜边光纤光栅的制作与特性分析

3.1 基本原理

从上面的计算结果知道,斜边光纤光栅的折射率调制函数为斜边三角函数。这种调制函数在紫外激光辐照制备光纤光栅时,可以采用扫描法来实现^[12]。利用光纤的应变特性,可以对光纤光栅进行应力调谐。如果采用工艺手段使光纤光栅的横截面积沿光纤轴向逐渐变化,在对光栅施加拉力时,光纤的应变将在光纤轴向发生相应的变化,从而可以得到不同啁啾量的斜边光纤光栅^[13]。

光纤光栅受到应变时,其峰值反射波长可以表示为^[14]

$$\lambda_B(\epsilon) = 2n_{\text{eff}}(\epsilon)\Lambda = 2(n_{\text{eff}0} + \kappa\epsilon)(1 + \epsilon)\Lambda_0 \approx 2(n_{\text{eff}0} + \kappa\epsilon)\Lambda_0, \quad (2)$$

$n_{\text{eff}0}$ 和 Λ_0 是光纤在应变为 0 时的基模有效折射率和光栅的周期, κ 是光纤折射率的应变系数。从 (2) 式看出,在小应变情况下,光栅的峰值反射波长改变量与应变成正比。

光栅在拉力 F 作用下,产生的应变可以表示为

$$\epsilon = F/ES, \quad (3)$$

E 是光纤的杨氏模量, S 是光纤的横截面积。由 (3) 式可见, ϵ 与 S 成反比关系。当 S 沿光纤轴向逐渐变化时,在一定的 F 下, ϵ 也将沿光纤轴向相应变化。从而可以在光栅的轴向上引入应变梯度,即对光栅引入了啁啾。

3.2 斜边光栅特性分析

从 (2) 式、(3) 式可见,要对均匀光栅引入线性啁啾,光栅横截面半径沿光栅长度的分布应该满足

$$R(z) = \left[\left(\frac{1}{R_L^2} - \frac{1}{R_0^2} \right) \frac{z}{L} + \frac{1}{R_0^2} \right]^{-1/2}, \quad (4)$$

R_0 、 R_L 是光纤 $z = 0$, $z = L$ 处横截面半径; $R_0 = 62.5 \mu\text{m}$ 为原始光纤半径。影响斜边光纤光栅光谱形状的因素有 p , R_L , L , F 和折射率调制幅度 dn 。下面给出斜边光栅反射光谱随这些变量的演化,如图 3 所示。

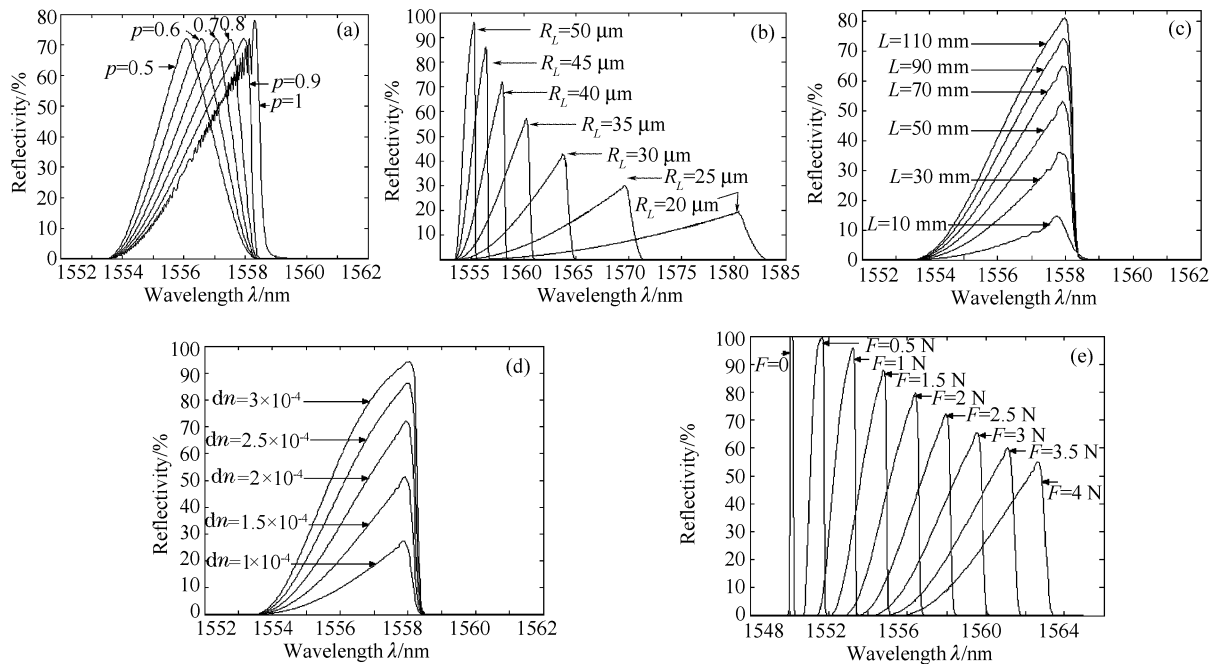


Fig. 3 (a) The EFBG spectrum at different p with $L = 85$ mm, $dn = 2 \times 10^{-4}$, $R_L = 40 \mu\text{m}$, $F = 2.5$ N, (b) The EFBG spectrum at different R_L with $L = 8.5$ mm, $dn = 2 \times 10^{-4}$, $p = 0.9$, $F = 2.5$ N, (c) The EFBG spectrum at different L with $dn = 2 \times 10^{-4}$, $p = 0.9$, $R_L = 40 \mu\text{m}$, $F = 2.5$ N, (d) The EFBG spectrum at different dn with $L = 8.5$ mm, $R_L = 40 \mu\text{m}$, $p = 0.9$, $F = 2.5$ N, (e) The EFBG spectrum at different F with $L = 8.5$ mm, $R_L = 40 \mu\text{m}$, $p = 0.9$, $dn = 2 \times 10^{-4}$

从图 3(a) 可见,随着 p 值的增大,斜边光栅斜边在短波方向的带宽变大,在长波方向的带宽变小,但维持光栅的总带宽不变。在传感领域中,斜边光栅作为传感信号的解调光栅,只需要利用其中一个斜边。因此也可以说,斜边光栅的有效带宽随着 p 值的增大而增大。当 $p = 1$ 时,光谱在短波方向的斜边上出现了抖动。因此在实际制作过程中斜边光栅的 p 值范围应控制在 $0.7 \leq p \leq 0.9$ 范围。从图 3(b)~图 3(e) 可见,斜边光栅的带宽随 R_L 的减小和 F 的增大而变宽;同时光栅的反射率变小。还可以看到, L 、 dn 变化时,斜边光栅的带宽保持不变,但反射率随 L 、 dn 的增大而变大。在 R_L 、 L 、 dn 、 F 变化的过程中,斜边光栅的斜边保持了非常好的线性度。因此可通过选取合适的 R_L 、 L 、 dn 、 F 的值来实现给定带宽、给定反射率的斜边光栅。在制作好光栅后可以通过给光栅施加不同的拉力来获得带宽大范围可调的斜边光纤光栅。

4 斜边光栅的实验结果

实验中,紫外光源采用 193 nm 准分子激光器,激光器的输出功率密度为 $80 \text{ mJ}/(\text{cm}^2 \cdot \text{pulse})$ 。紫外激光通过宽度为 3 mm 狭缝后照射在啁啾相位

模版和经过载氢处理的 Corning SMF-28 标准单模光纤上。光纤紧贴相位模版并固定在步进电机平台上。用 LabView 语言编写步进电机的控制程序,使光纤各点在狭缝处停留的时间符合设计要求的斜边三角形关系。实验中采用啁啾相位模版的啁啾系数为 $0.009 \text{ nm}/\text{mm}$,光栅长度为 85 mm, p 值取为 0.7。制备好的光栅典型反射谱如图 4 所示,峰值反射率达 96%,从光栅反射谱中可以看出光栅在短波方向和长波方向的斜边线性好。

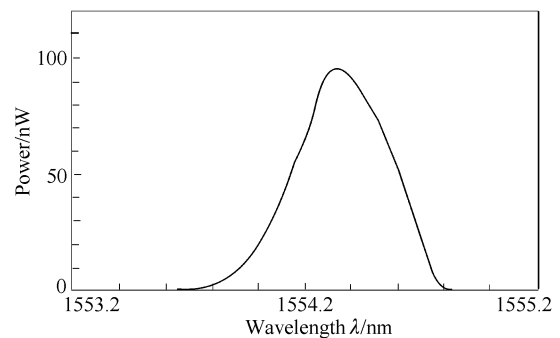


Fig. 4 The reflection spectrum of the fabricated EFBG

光栅退火后,采用氢氟酸腐蚀的方法对光纤外径进行加工。在 $30 \text{ }^\circ\text{C}$ 下,把光栅区浸入浓度为 17% 的 HF 酸溶液中。光纤的一端固定在步进电机上,步进

电机按编写好的程序拉动光纤,控制光栅各点在 HF 酸溶液中停留的时间,使光纤横截面半径沿光栅长度的分布满足(4)式。设计光栅在处, $R_L = 45 \mu\text{m}$ 。腐蚀后光纤外径的测量结果如图 5 所示。

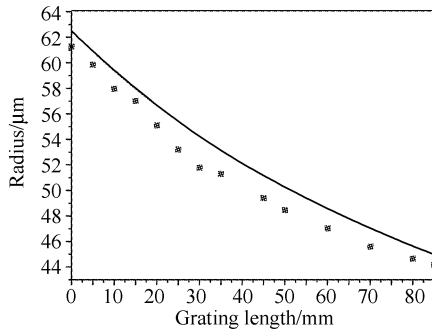


Fig. 5 The radius profile of FBG after etching, the solid line shows the theory calculated profile and the square dots show the experiment measured profile. ■ is the measured value

对外径加工后的光纤光栅施加拉力,得到了光栅反射谱随拉力的变化如图 6 所示。当拉力由 0 增大到 1.715 N 时,光栅短波方向的斜边带宽由 0.7 nm 增大到 2.3 nm。实验结果和理论模拟结果图 3(e)的变化趋势是一样的。实验结果表明,本带宽大范围可调的斜边三角形光纤光栅滤波器制作技术是可行的。

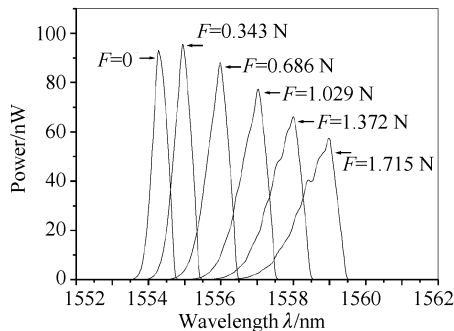


Fig. 6 The reflection spectrum of the fabricated EFBG at different F

结论 研究了一种带宽大范围可调的斜边三角形光纤光栅。基于遗传算法的逆工程设计表明,这种光纤光栅要求折射率调制函数为斜边三角函数;实验中用紫外激光光束扫描辐照法制作了斜边三角形光纤光栅;用程序控制的氢氟酸腐蚀方法制备光纤外径沿轴向的分布变化。对光纤光栅施加不同的拉力,得到了斜边带宽调节范围为 0.7 nm 到 2.3 nm 的斜边光纤光栅。本带宽大范围可调三角形光谱的

光纤光栅,在传感测量系统的光谱解调方面有很好的应用前景。

参 考 文 献

- 1 Kersey A D, Bekoff T A, Morey W W. High resolution fiber Bragg grating based strain sensor with interferometric wavelength shift detection. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(3): 236~237
- 2 Kersey A D, Berkoff T A, Morey W W. Multiplexed fiber Bragg grating strain-sensor system with a fiber Fabry-Perot wavelength filter. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(16):1370~1372
- 3 Xu M G, Geiger H, Archambault J L *et al.*. Novel interrogating system for fiber Bragg grating sensors using an acousto-optic tunable filter. *Electron. Lett.*, 1993, **29**(17):1510~1511
- 4 Melle S M, Liu K, Measures R M. A passive wavelength demodulation system for guided-wave Bragg grating sensors. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1992, **4**(5): 516~518
- 5 Kersey A D, Davis M A, Patrick H J *et al.*. Fiber grating sensors. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1442~1463
- 6 Davis M A, Kersey A D. All-fibre Bragg grating strain-sensor demodulation technique using a wavelength division coupler. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(1):75~77
- 7 Lobo Ribeiro A B, Ferreira L A, Tsvetkov M *et al.*. All-fibre interrogation technique for fibre Bragg sensors using a biconical fibre filter. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(4):382~383
- 8 Fallon R W, Zhang L, Everall L A *et al.*. All-fibre optical sensing system: Bragg grating sensor interrogated by a long-period grating. *Meas. Sci. Technol.*, 1998, **9**: 1969~1973
- 9 Liu Y, Zhang L, Bennion I. Fabricating fibre edge filters with arbitrary spectral response based on tilted chirped grating structures. *Meas. Sci. Technol.*, 1999, **10**:L1~L3
- 10 Chen L R, Cooper D J F, Smith P W E. Transmission edge filters for power equalization of EDFA'S. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(7):822~824
- 11 Yu Youlong, Tam Hwayaw. Active spatial/wavelength-division multiplexed fiber Bragg grating sensor system. *Chin. J. Lasers (中国激光)*, 2002, **A29**(2):131~134
- 12 Cole M J, Loh W H, Laming T I *et al.*. Moving fibre/phase mask-scanning beam technique for enhanced flexibility in producing fibre gratings with uniform phase mask. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(17):1488~1490
- 13 Wei Zhangxiong, Qin Lin, Wei Xin *et al.*. Fabrication of chirped fiber gratings using fiber Bragg gratings. *Acta Optica Sinica (光学学报)*, 1999, **19**(11):1563~1566 (in Chinese)
- 14 Henrikson A, Sandgren S, Assch A. Temperature insensitivity of a fiber optic Bragg grating sensor. *Proc. SPIE*, 1996, **2839**:20~33