

高频 CO₂ 激光脉冲写入的相移长周期光纤光栅*

李景义 饶云江 牛永昌 聂 玲

(重庆大学光电工程学院, 重庆 400044)

摘 要 运用矩阵传输法,并结合长周期光纤光栅的模式耦合理论,阐述了相移长周期光纤光栅传输光谱的形成原理.利用高频 CO₂ 激光脉冲制作出相移长周期光纤光栅.该方法仅需用计算机绘制光栅结构图形,再由计算机依照此图形控制 CO₂ 激光器对普通光纤曝光,就可自动完成光纤光栅的制作.实际制造出一条相移长周期光纤光栅,在 1520 ~ 1570 nm 和 1610 ~ 1670 nm 波长范围内分别呈现出相移图样,相移波段的通带中心波长分别为 1546 nm 和 1640 nm.对光栅进行温度测试,观测 1610 ~ 1670 nm 范围内相移光谱的变化,发现相移光栅的通带及阻带中心波长具有相同的温度变化系数,其数值为 0.064 nm/°C,另外又测试了光栅的应变特性,灵敏度约为 -0.51 nm/me.因此在利用光栅温度特性或应变特性做传感的过程中,可以仅测试通带中心波长的变化,实现低成本多样化的测量手段.

关键词 矩阵传输;相移长周期光纤光栅;高频 CO₂ 激光脉冲

中图分类号 TN253 **文献标识码** A

0 引言

近年来有关长周期光纤光栅(Long-period fiber grating: LPFG)的制作^[1]与应用的研究有了长足的发展.作为全光纤器件,长周期光纤光栅具有一些不容忽视的优点:插入损耗小、无后向反射、与偏振无关等,还具有优良的温度、弯曲、扭曲等特性,这些共同决定了 LPFG 在通信与传感领域得到了广泛重视,并不断吸引着人们对其制作方法和应用做更深入的研究,一些特种 LPFG,例如相移长周期光纤光栅(phase-shifted long period fiber grating: PSLPG)的制作与应用也引起了人们极大的兴趣,之前相继报道过 PSLPG 的原理^[2,3],以及 PSLPG 用做掺铒光纤放大器的增益平坦^[4]等应用,这些 PSLPG 大部分都是用紫外光在光敏光栅中曝光制作的,成本比较高.

本文首次报道了利用高频 CO₂ 激光脉冲曝光法在普通单模光纤中写入的 PSLPG.关于这类特种光栅的制作方法,此前仅报道过紫外写入法,与其相比,高频 CO₂ 激光脉冲写入法^[5,6]机理不同,是利用了激光脉冲的热冲击效应,因此可以直接在普通单模光纤中制作,不需要掩模板,工艺简单,成本低.此外由于高频 CO₂ 激光脉冲能量高,单脉冲加热作用时间短,因此能在短时间内制作出性能稳定的高质量光栅,制作效率高,光栅的热稳定性好^[7].用这种方法在普通光纤中成功制作出一条长周期相移光

纤光栅,在 1520 ~ 1570 nm 和 1610 ~ 1670 nm 波长范围内分别呈现出相移图样,由于具有这种特殊的光谱,此类光栅可以用在通信中辅助实现滤波、选频、粗波分复用、增益平坦等;在传感中也可以直接利用其通带中心波长进行检测,获得较高的光强信号,提高信噪比,从而提高测量的精度.

1 理论分析

LPFG 的模式有效折射率变化 $\delta n_{\text{eff}}(z)$ 可以表示为 $\delta n_{\text{eff}}(z) = \overline{\delta n_{\text{eff}}}(z) \{1 + v \cos [(2\pi/\Lambda)z + \phi(z)]\}$ (1) 式中 $\overline{\delta n_{\text{eff}}}(z)$ 表示一个光栅周期上平均有效折射率的变化, v 表示折射率调制的条纹可见度, Λ 为光栅周期.由于光纤的折射率调制使得模式之间发生耦合,耦合方程可以近似表示为

$$\left. \begin{aligned} dR/dz &= i\hat{\sigma}R(z) + ikS(z) \\ dS/dz &= -i\hat{\sigma}S(z) + ik^*R(z) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

R, S 分别表示纤芯导模与包层模沿光纤轴向的幅度,其中 $\hat{\sigma}$ 和 k 分别表示直流“dc”自耦合系数和模式间的交流“ac”交叉耦合系数, * 表示共轭,以下同理.

将有 N 个周期的均匀 LPFG 的每个周期视为一个单元,其中包括折射率受扰动区域与未受扰动区域,分别称为 1 区与 0 区.利用传输矩阵方法^[8]求解方程(2),可得第 m 个单元的传输矩阵为

$$F_m = \begin{bmatrix} \exp(i\theta_k) \{ \delta_k^2 + |\gamma|^2 \exp[i\Delta^{(1)}] \} & \exp(i\theta_k) \gamma \{ \delta_k - \delta_j \exp[i\Delta^{(1)}] \} \\ -\exp(i\theta_j) \gamma^* \{ \delta_j - \delta_k \exp[-i\Delta^{(1)}] \} & \exp(i\theta_j) \{ \delta_k^2 + |\gamma|^2 \exp[-i\Delta^{(1)}] \} \end{bmatrix} \quad (3)$$

* 杰出青年科学基金(批准号:60025515)资助
Tel:023-65105543 Email:shshjk@sohu.com
收稿日期:2003-11-24

$\delta_k, \delta_j, \gamma$ 分别为 k 阶模 j 阶模的自耦合率与交叉耦合率, θ_k, θ_j 分别代表 k, j 阶模式的总相位, $\Delta^{(1)}, \Delta^{(0)}$ 分别代表 1 区与 0 区中两种模式总的相位差.整个

光栅的传输矩阵可以用下式表示

$$F = \sum_{m=1}^N F_m \quad (4)$$

当在光栅的第 n 个与第 $n+1$ 个周期之间引入一段长度为 L 的未受扰动的光纤时, 传输矩阵 F_n 、 F_{n+1} 之间要相应插入相移矩阵 F_{ps}

$$F_{ps} = \begin{bmatrix} \exp(-j\beta_1 L) & 0 \\ 0 & \exp(-j\beta_2 L) \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中 β_1 、 β_2 分别代表 R 、 S 的传播常数, 最后得到相移光栅的传输矩阵为

$$F = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} \\ F_{21} & F_{22} \end{bmatrix} = F_1 \cdots F_n F_{ps} F_{n+1} \cdots F_N \quad (6)$$

LP₀₁ 模式的传输系数为 $t = |F_{11}|^2$. 在光栅制作过程中可以通过控制 L 长度得到不同的相移量.

本次实验设计的光栅是在普通均匀长周期光纤光栅中插入长度为 $\Lambda/2$ 的未受扰光纤. 由光栅的相位匹配条件 $\Lambda = 2\pi/(\beta_1 - \beta_2)$ 可以知道, 一个光栅周期对应 2π 相位变化, 所以插入 $L = \Lambda/2$ 长度的未受扰光纤对应的相位变化为 π . 因此, 会在普通光栅光谱的阻带中心波长处产生一个通带.

2 制作过程

图 1 为光栅制作系统结构图, 将普通光纤的涂层剥掉 50 mm 左右, 水平放置在 CO₂ 激光器聚焦透镜的焦平面上, 由于光纤在 CO₂ 激光加热过程中可能产生物理延长^[9], 因此, 需要悬挂重物使其保持恒定的轴向应力, 从而始终处于水平状态. 使用宽带光源做输入, 光谱仪用来监测光栅谱线的变化. 关键设备是高频 CO₂ 激光器, 全功率为 10 W, 制作光栅时使用的工作频率为 5 kHz, 由于单脉冲激光

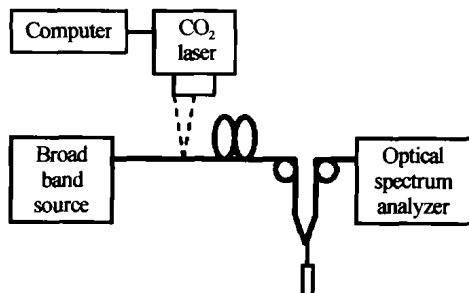


图 1 高频 CO₂ 激光脉冲写入系统
Fig. 1 The fabrication system

能量固定, 对光栅的加热是激光释放时间内多脉冲的累积效应, 可以通过改变激光脉冲的释放时间来控制激光的能量. 激光头的扫描振镜可以完成二维扫描, 激光束通过焦距为 100 mm 的透镜聚焦, 产生 50 μm 左右的光斑.

在制作过程中, 预先在计算机中绘制光栅图样, 之后由计算机根据此图样控制激光器的二维扫描振镜, 先使激光脉冲沿光纤横向扫描, 再按光栅图样要求沿光纤轴向移动, 依次逐点扫描. 由于激光束在光纤某点上一次曝光难以达到制作要求, 所以要依

照上述流程反复扫描, 直到制作出满意的光栅.

实际制作中选用的是康宁 SMF-28 光纤, 选取的光栅周期为 600, 周期数为 60, 光栅中央的间隔为 300, 光栅总的长度为 35.7 mm, 制作的 PSLPG 谱图如图 2 所示. 在波长为 1520 ~ 1570 nm 和 1610 ~ 1670 nm 范围内分别呈现出相移光栅的图样, 相移波段的通带中心波长分别为 1546 nm 和 1640 nm.

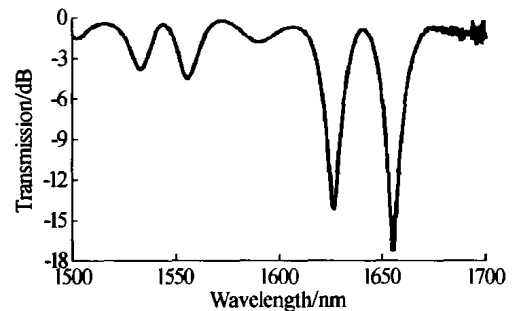


图 2 相移光纤光栅谱图
Fig. 2 Spectra of PSLPG

3 特性研究

3.1 温度特性

在实验中测试了 PSLPG 的温度特性. 实验过程中, 对光栅加热, 从 20℃ 起, 每隔 5℃ 记录一次相移区域的两个阻带中心波长与一个通带中心波长的位置, 直到 80℃, 将所得数据绘制成温度响应曲线, 如图 3 所示其中 A 表示 1610 ~ 1670 nm 范围内相移

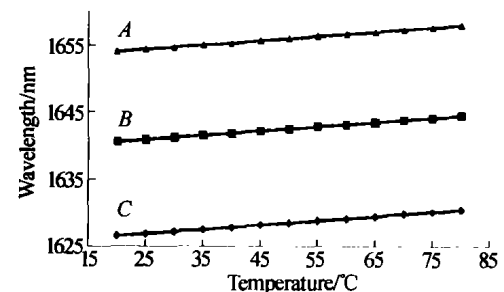


图 3 相移光栅的温度响应曲线
Fig. 3 Temperature response of PSLPG

区右边一个阻带的中心波长的变化, 起始位置为 1654 nm, B 表示相移区的通带中心波长的变化, 起始位置为 1640.6 nm, C 表示相移区左边一个阻带中心波长的变化, 起始位置为 1626.6 nm. 由图形可以看出, 三者具有相同的温度变化趋势, 经计算可得, 三者的灵敏度都约为 0.064 nm/℃.

3.2 应变特性

在实验中又对 PSLPG 的温度特性进行了测试. 将光栅拉紧, 一端固定, 另外一端施加应变, 每隔 50 μe 记录一次数据, 直到应变量达到 1000 μe . 所得到的数据绘制成应变响应曲线, 如图 4 所示. 其中 A、B、C 曲线代表的波长起始位置与图 3 相同. 由图中曲线可以看出, 承受应力应变时, 三者具有相同的变化趋势, 灵敏度都约为 -0.51 nm/ μe .

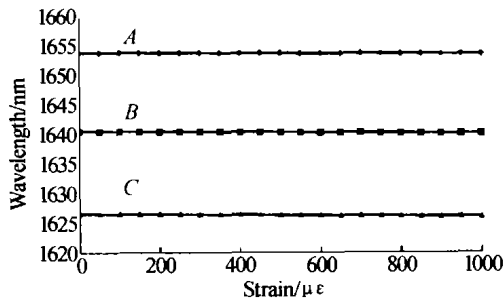


图4 相移光栅的应变特性曲线
Fig. 4 Strain response of PSLPG

4 结论

利用高频 CO_2 激光脉冲在普通光纤中逐点曝光,可以制作出理想的 PSLPG. 与已报道的紫外光写入法相比,这种方法不必使用价格昂贵的光敏光纤,成本低;使用计算机绘图控制激光脉冲逐点曝光,不需要掩模板,容易调整光栅的周期和相移量,工艺简单,制作方便,成本低廉. 由于单脉冲的激光能量高,作用时间短,因此制作效率高. 制作出的相移光栅由于自身具有特殊的光谱特性,可以在通信领域实现选频、带通滤波等功能. 经测试这种光栅具有较好的温度和应变特性,因此在传感中也可以利用其带通特性,获得较高的光强信号,使用边缘滤波法、带通滤波器法等多种探测手段对其通带中心波长进行探测,避免使用价格昂贵的光谱仪,实现测量方法的多样化和低成本化.

Phase-shifted Long-period Fiber Grating Written by High-frequency CO_2 Laser Pulses

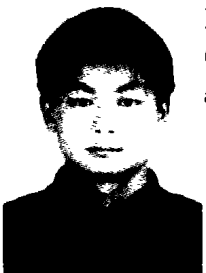
Li Jingyi, Rao Yunjiang, Niu Yongchang, Nie Ling

Department of Optoelectronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044

Received date: 2003-11-24

Abstract The spectrum of phase-shifted long-period fiber grating is analyzed by the coupled-mode theory and transfer-matrix method. Then under the guidance of this analysis, it is for the first time that the phase-shifted long-period fiber grating is fabricated successfully by using high-frequency CO_2 laser pulses. During the process of fabrication, computer is used to draw the structural graph of the gratings and to control the power and time of laser pulses exposed on the optical fiber. In such a way, the gratings are made automatically. The grating made actually shows the phase-shifted spectrum during the scale of 1520 ~ 1570 nm and 1610 ~ 1670 nm. The temperature response of the latter is tested, and the result shows that the center wavelengths of the one pass band and the two loss bands have the same index: 0.064 nm/ $^{\circ}\text{C}$. What's more, the strain response of the PSLPG is measured, and the result shows that the index is -0.51 nm/ $\mu\epsilon$. So in the sensing field, it is viable to test the centre wavelength of the pass band to measure the change of the environment.

Keywords Transfer-matrix; Phase-shifted long-period fibre grating; High-frequency CO_2 laser pulses



Li Jingyi achieved his bachelor degree from Optoelectronic Engineering Department of Chongqing University in 2002, now he is pursuing master degree in the optical fiber sensing field at the same academy. His research is focused on the novel sensing technology.

参考文献

- 宋宁,郭晓金,殷宗梅. 长周期光纤光栅的分析与优化设计. 光子学报, 2003, **32**(6): 735 ~ 737
Song N, Guo X J, Yin Z M. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(6): 635 ~ 637
- Liu Y, Williams J A R, Zhang L, et al. Phase shifted and cascaded long-period fiber grating. *Optics Communication*, 1999, **164**(1999): 27 ~ 31
- Ke H, Chiang K S, Peng J H. Analysis of phase-shift long-period fiber gratings. *IEEE Photo Tech Lett*, 1998, **10**(11): 1596 ~ 1598
- 钱景仁,陈后飞. 相移长周期光纤光栅及其在增益谱平坦化中的应用. 光学学报, 1999, **19**(9): 1207 ~ 1211
Qian J R, Chen H F. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(9): 1207 ~ 1211
- 王义平,饶云江,冉曾令,等. 对弯曲不敏感的长周期光纤光栅传感器. 光子学报, 2002, **31**(6): 725 ~ 729
Wang Y P, Rao Y J, Ran Z L, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(6): 725 ~ 729
- 冉曾令,饶云江,朱涛,等. 基于新型长周期光纤光栅的掺铒光纤放大器. 光子学报, 2003, **32**(1): 72 ~ 75
Ran Z L, Rao Y J, Zhu T. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(1): 72 ~ 75
- Davis D D, Gaylord T K, Glytsis E N, et al. Very-high-temperature stable CO_2 -laser-induced long-period fibre gratings. *Electron Lett*, 1999, **35**(9): 740 ~ 742
- Chern G W, Wang L A. Transfer-matrix method based on perturbation expansion for periodic and quasi-periodic binary long-period gratings. *J Opt Soc Am A*, 1999, **16**(11): 2675 ~ 2689
- Grellier A J C, Zayer N K, Prnell C N. Heat transfer modeling in CO_2 laser processing of optical fibers. *Optics Communications*, 1998, **152**(1998): 324 ~ 328