

高频 CO₂ 激光脉冲写入的超长周期光纤光栅*

朱 涛^{1,2} 饶云江^{2,1} 莫秋菊¹

(1 重庆大学光电工程学院, 重庆 400030)

(2 电子科技大学通信与信息工程学院, 成都 610015)

摘 要 研究了周期为 3 mm 的超长周期光纤光栅(ULPFG)各谐振峰的温度和应变特性,报道了用高频 CO₂ 激光脉冲写入的周期可达数毫米的包层折变非对称分布的 ULPFG. 该光栅各谐振峰由不同阶次闪耀模与纤芯基模同向耦合而成,理论和实验表明不同阶次谐振峰对外界参数如温度、应变等变化具有不同的灵敏度,因此这种 ULPFG 可望用于多参数同时测量中.

关键词 导波光学;光纤传感器;CO₂ 激光脉冲;ULPFG;多参数

中图分类号 TN253 **文献标识码** A

0 引言

近年来,许多学者在长周期光纤光栅(LPFG)研究方面做了大量工作,比如利用长周期光纤光栅制作掺铒光纤放大器的增益均衡器^[1,2]和 ASE 噪声滤波器^[3],以及温度、应变、扭曲等传感器^[4~6]. 但人们主要集中在对周期为几十到几百微米的传统周期光纤光栅进行研究,而对周期达几个毫米的超长周期光纤光栅(ultra-long-period fiber grating-ULPFG)研究得较少,Shu 等人^[7]在 2002 年报道了用紫外光写入的 ULPFG,这种光栅的折变主要发生在纤芯,其谐振峰耦合效率较低,并且它对外界环境参数的变化不太敏感,这些特点限制了 ULPFG 在传感中的应用. 文中报道了用高频 CO₂ 激光脉冲写入的 ULPFG,光栅折射率改变主要发生在光纤包层,并且横向折变呈非对称分布,相比紫外写入法,这种方法写入的 ULPFG 将具有一些独特的光学特性. 理论分析表明,新型 ULPFG 相应谐振峰具有更高的外界参数响应灵敏度. 实验结果表明这种新型 ULPFG 各谐振峰具有不同的温度、应变灵敏度,这为单个器件实现多参数同时测量提供了思路,并且这种方法对写入光纤没有特殊要求,写入过程实现了自动化,因此光栅的写入效率高,成本低,在光纤传感中将具有较大的潜在应用价值.

1 ULPFG 写入及耦合原理

利用高频 CO₂ 激光脉冲写入装置^[8],设定 ULPFG 周期,制作出了周期分别为 1 mm、2 mm 和 3 mm 的 ULPFG,图 1 为它们的透射谱(图中^NLP_{0m}

表示具有 N 阶闪耀级次的第 m 次包层模谐振峰),这些谐振峰是纤芯基模耦合到不同闪耀级次包层模的结果. 采用单侧激光入射的写入方法,其激光脉冲焦斑小、瞬态功率大、激光脉冲持续时间短,所以在光纤径向由于快速固化作用和残余应力释放将引起光纤包层径向折射率发生渐变,这种变化从激光入射处到纤芯逐渐减小,而纤芯的折射率变化非常小;另外,在光纤轴向,光栅每个周期的折变区域近似方差较小的高斯分布,而不是一个理想的矩形分布,所以高频 CO₂ 激光脉冲写出的光栅具有较好的耦合效率,并且每个谐振峰的“拖尾”现象也很小.

基于长周期光纤光栅的同向耦合理论^[9], ULPFG 闪耀光栅高阶耦合的相位匹配条件可写为

$$\lambda_{\text{res}}^{N,m} = (n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{eff}}^{\text{cl},N,m}) \frac{\Lambda}{N} \left[1 + \frac{(\delta n_{\text{eff}}^{\text{co}} - \delta n_{\text{eff}}^{\text{cl},N,m}) \cdot d\lambda_{\text{cl}}^{N,m}/d\Lambda}{(n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{eff}}^{\text{cl},N,m})^2} \right] \quad (1)$$

式(1)中, $\lambda_{\text{res}}^{N,m}$ 是谐振波长, Λ 是 ULPFG 的周期, N 是闪耀阶数, $n_{\text{eff}}^{\text{co}}$ 和 $n_{\text{eff}}^{\text{cl},N,m}$ 分别为纤芯基模和第 N 阶闪耀模第 m 次包层模的有效折射率, $\delta n_{\text{eff}}^{\text{co}}$ 和 $\delta n_{\text{eff}}^{\text{cl},N,m}$ 分别为纤芯基模和第 N 阶闪耀模第 m 次包层模的有效折射率的变化量, $\lambda_{\text{cl}}^{N,m}$ 为最初的设计谐振波长,其值等于 $\delta n_{\text{eff}}^{\text{co}}$ 和 $\delta n_{\text{eff}}^{\text{cl},N,m}$ 都为 0 时的谐振波长. 从式(1)可知,对于 $\delta n_{\text{eff}}^{\text{co}}$ 和 $\delta n_{\text{eff}}^{\text{cl},N,m}$ 一个微小的变化, $\lambda_{\text{res}}^{N,m}$ 将极大的依赖于光栅周期和耦合的闪耀阶数. 另外,紫外写入的 ULPFG 其 $\delta n_{\text{eff}}^{\text{co}}$ 占主要因数,而用高频 CO₂ 激光脉冲写入的 ULPFG 其折变主要在包层,所以 $\delta n_{\text{eff}}^{\text{cl},N,m}$ 将占主要因数,这一点就使得新型 ULPFG 很容易受到外界环境条件比如温度、弯曲、扭曲、横向负荷、折射率等的影响,并且其谐振谱将可能具有独特的光学特性.

另外从式(1)还可以知道,如果光栅纤芯和包层的有效折射率差非常接近,那么不同光栅谐振峰的

*教育部重点基金(批准号:104210)和重庆市自然科学基金重点基金(批准号:8415)资助

Tel:023-65111973 Email: fiberlab@cqu.edu.cn

收稿日期:2005-04-15

位置将与光栅周期、闪耀级数呈现一定的对应关系，即假如光栅 1 周期是光栅 2 的 N 倍，那么光栅 1 在第一阶闪耀级次处的谐振峰位置将与光栅 2 在第 N 阶闪耀级次处谐振峰的位置接近，这点从图 1 各周期光栅谐振峰的分布可以看出。

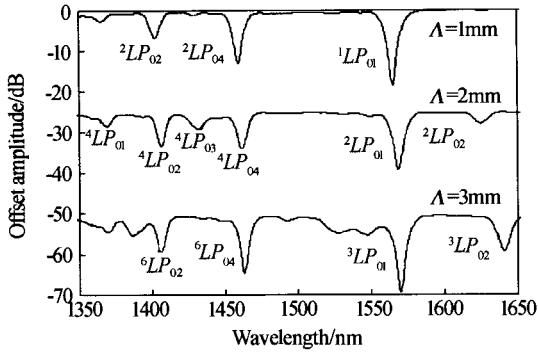


图 1 周期分别为 1 mm、2 mm 和 3 mm 的 ULPFG 的透射谱

Fig. 1 The transmission spectrum of ULPFGs with periods of 1 mm, 2 mm and 3 mm

2 实验及结果

根据第 1 部分的理论描述，可知 ULPFG 的谐振峰是纤芯基模耦合到包层模的不同闪耀级次而形成，不同阶次谐振峰对外界参数具有不同的灵敏度。这里采用在康宁 SMF-28 单模光纤上写出周期为 3 mm 的 ULPFG，并实验研究 ${}^6LP_{04}$ 和 ${}^3LP_{01}$ 两个耦合谐振峰的温度和应变特性。 ${}^6LP_{04}$ 谐振峰的初始谐振波长和共振峰幅度分别为 1464 nm 和 -13.76 dB；谐振峰的初始谐振波长和共振峰幅度分别为 1570.8 nm 和 -18.76 dB。

图 2 是周期为 3 mm 的 ULPFG ${}^6LP_{04}$ 和 ${}^3LP_{01}$ 谐振峰的温度特性曲线，可见在 20℃ 到 100℃ 之间，它们的温度灵敏度不同，并且各谐振峰波长漂移与温度变化成线性关系。实验测得， ${}^6LP_{04}$ 谐振峰的温度灵敏度为 0.04 nm/℃，而 ${}^3LP_{01}$ 谐振峰的灵敏度为 0.08 nm/℃。此外，由于输入光信号偏振态的变

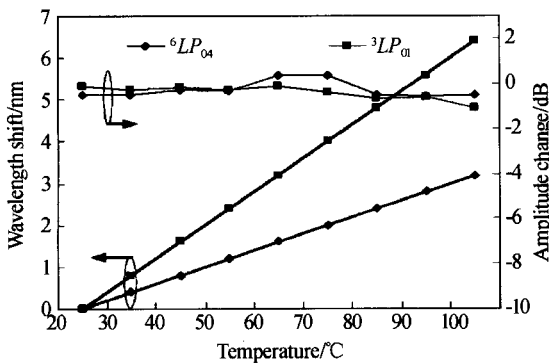


图 2 周期为 3 mm 的 ULPFG 的温度特性
Fig. 2 Temperature response of ULPFG with period of 3 mm

化，以及外界条件的变化将使纤芯基模与包层模不同闪耀级次的耦合强度发生变化，从而使得谐振峰幅度随外界条件的变化而变化，但其变化程度很小，最大约为 0.5 dB，这点从图 2 可以看出。

图 3 为 ${}^6LP_{04}$ 和 ${}^3LP_{01}$ 两个谐振峰的应变实验结果，从图 3 可见，该 ULPFG ${}^6LP_{04}$ 和 ${}^3LP_{01}$ 谐振峰的应变灵敏度也不同，并且在一定的应变范围内，各谐振峰幅度变化、波长漂移都与应变成近似线性关系。实验测得 ${}^6LP_{04}$ 谐振峰的波长应变灵敏度为 -0.25 nm/mε，而 ${}^3LP_{01}$ 谐振峰的波长应变灵敏度为 -0.5 nm/mε；前者谐振峰幅度应变灵敏度为 -0.25 dB/mε，后者谐振峰幅度应变灵敏度为 0.16 dB/mε。由于新型 ULPFG 高阶模的相互耦合性，不同周期不同谐振峰的幅度灵敏度变化的极性出现相反的情况是完全可能的。

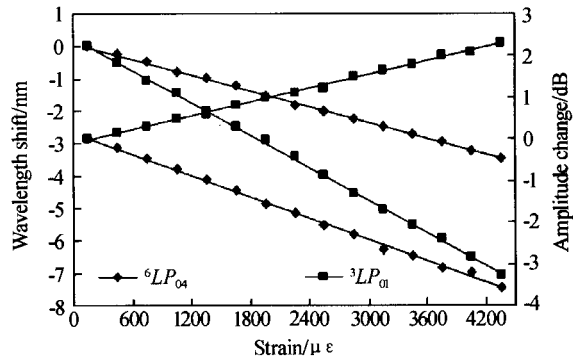


图 3 周期为 3 mm 的 ULPFG 的应变特性
Fig. 3 Strain response of ULPFG with period of 3 mm

从 ULPFG 的温度和应变特性可以知道，不同谐振峰波长具有不同的温度和应变灵敏度，因此，可以利用单个 ULPFG 实现温度和应变的同时测量，然后通过解两个线性方程就可以求出环境的温度和应变变化。假设实验中周期为 3 mm 的 ULPFG ${}^6LP_{04}$ 和 ${}^3LP_{01}$ 谐振峰谐振波长温度灵敏度系数分别为 T_1 和 T_2 ，应变灵敏度系数分别为 S_1 和 S_2 ，环境温度变化和应变变化分别为 ΔT 和 $\Delta \epsilon$ ，环境温度和应变发生变化后， ${}^6LP_{04}$ 和 ${}^3LP_{01}$ 谐振峰波长漂移量分别为 $\Delta \lambda_1$ 和 $\Delta \lambda_2$ ，则可以建立如下的线性方程组

$$\begin{cases} \Delta \lambda_1 = T_1 \Delta T + S_1 \Delta \epsilon \\ \Delta \lambda_2 = T_2 \Delta T + S_2 \Delta \epsilon \end{cases} \quad (2)$$

通过解式(2)就可以求出环境温度和应变的变化量 ΔT 和 $\Delta \epsilon$ ，从而实现温度和应变的同时测量。但在工程应用中，必须考虑温度和应变的测量范围；如果测量范围较小，式(2)可以结合专家库或查询方法等一起使用，但是当测量范围很大甚至超出了 ULPFG 的线性变化区时，式(2)就不再适用，该测量方法也就失去了应用的基础。

针对 ULPFG 的耦合特性，并结合 ULPFG 的

温度和应变特性,可以提出 ULPGF 的一些应用方案:1)因为 ULPGF 各谐振峰具有不同的温度、应变灵敏度,并且在一定范围内温度和应变的变化是线性的,所以可以利用一支 ULPGF 实现温度和应变的同时测量;2)高频 CO₂ 激光脉冲写出的 LPFG 具有一些独特的弯曲和扭曲特性^[6,10],可以预见 ULPGF 一样具有,并且其响应灵敏度会更高,因此可用 ULPGF 实现高灵敏度的扭曲/弯曲测量. 有关 ULPGF 进一步的研究正在进行中.

3 结论

介绍了用高频 CO₂ 激光脉冲写入法制作的超长周期光纤光栅器件,指出这种方法写入的 ULPGF 具有比紫外光写入的 ULPGF 更好的耦合效率、更低的插入损耗和更低的器件成本. 应用模式耦合理论和有效折射率的概念从理论上简单描述了谐振峰的形成,这跟实验结果吻合得很好. 本文还实验研究了超长周期光纤光栅的温度特性和应变特性,结果表明,ULPGF 各谐振峰具有不同的温度灵敏度和应变灵敏度,利用一支 ULPGF 就可以实现温度和应变的同时测量;此外,由于 ULPGF 横向折变区域呈非对称分布,其各个谐振峰将会具有不同的弯曲灵敏度和扭曲灵敏度,可以预见新型 ULPGF 将在高灵敏度弯曲/扭曲测量方面具有较大的潜在应用价值.

参考文献

- 1 朱涛,饶云江,冉曾令,等. 一种基于新型长周期光纤光栅的动态增益均衡器. 光子学报,2003, **32**(3):283~285
Zhu T, Rao Y J, Ran Z L, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(3):283~285
- 2 王义平,饶云江,冉曾令,等. 一种新颖的长周期光纤光栅可调增益均衡器. 光学学报,2003, **23**(8):970~973

- Wang Y P, Rao Y J, Ran Z L, et al. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(8):970~973
- 3 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, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(1):72~75
- 4 Rao Y J, Wang Y P, Ran Z L, et al. Novel fiber-optic sensors based on long-period fiber gratings written by high-frequency CO₂ laser pulses. *J of Lightwave Technology*, 2003, **21**(5):1320~1325
- 5 Liu H B, Liu H Y, Whitbread T, et al. A simple stain sensor using polymer fiber Bragg grating and long-period fiber grating. *Advanced Sensor Systems and Application II. Proc of SPIE*, 2004, **5634**:123~127
- 6 王义平,饶云江,胡爱姿,等. 长周期光纤光栅扭曲传感器. 光学学报,2002, **22**(9):1096~1099
Wang Y P, Rao Y J, Hu A Z, et al. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(9):1096~1099
- 7 Shu X W, Zhang L, Bennion I. Fabrication and characteristics of ultra-long-period fibre gratings. *Optics Communications*, 2002, **203**(3-6):277~281
- 8 Rao Y J, Wang Y P, Ran Z L, et al. Characteristics of novel long-period fiber gratings written by focused high-frequency CO₂ laser pulses. *Asia-Pacific Optical and Wireless Communications*, 2001, *Proc of SPIE*, 2001, **4581**:327~333
- 9 Trevor W M, Saeed P, Charles W H, et al. Generalized expression for the growth of long period gratings. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1998, **10**(10):1449~1451
- 10 王义平,饶云江,曾祥楷. 长周期光纤光栅弯曲特性的耦合模理论分析. 光子学报,2002, **31**(10):1205~1208
Wang Y P, Rao Y J, Zeng X K. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(10):1205~1208

Ultra-Long Period Fiber Gratings Written by High-Frequency CO₂ Laser Pulses

Zhu Tao^{1,2}, Rao Yunjiang^{2,1}, Mo Qiuju¹

¹ Department of Optoelectronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030

² School of Communication and Information Engineering, Electronics Science and Technology University, Chengdu 610015

Received date: 2004-04-15

Abstract Novel ultra-long period fiber gratings (ULPFGs) with periods of up to several millimeters, which were written by the high-frequency CO₂ laser pulses, were reported. The refractive index change occurred mainly within the cladding area of the fiber and had an unsymmetrical distribution on the cross-section of the ULPFG. The resonant loss peaks of the ULPFG were generated from the coupling of the forward propagating core mode to the cladding modes of fundamental and harmonic orders. Such a ULPFG can be used to measure multi-parameters simultaneously as these resonant loss peaks have different sensitivities to temperature, strain, bending and torsion, et al. The temperature and strain characteristics of the ULPFGs with 3 mm period were investigated by experiment. Meanwhile, several new approaches of the potential applications of the ULPFG were proposed.

Keywords Waveguide optics; Optical fiber sensors; CO₂ lasers pulses; ULPFG; Multi-parameter



Zhu Tao was born in 1976, in Sichuan, China. He received the B. S. degree and M. S. degree from the Chongqing University in 2000 and 2003, respectively. At present, he is a Ph. D. degree candidate in Chongqing University. His present interests are optical communication devices and optical sensing devices.