

连续 CO₂ 激光脉冲制作长周期光纤光栅的研究*

严明 罗售余 张智明

(上海交通大学物理系, 上海 200240)

摘要 利用耦合模理论分析了均匀长周期光纤光栅中的模式耦合, 描述了连续 CO₂ 激光脉冲逐点写入长周期光纤光栅技术的实验研究情况, 实验中观测到模式耦合强度随光栅区域长度发生周期性变化.

关键词 长周期光纤光栅; 耦合模理论; 连续 CO₂ 激光脉冲; 模式耦合

中图分类号 TN256 **文献标识码** A

0 引言

长周期光纤光栅 (Long-Period Fiber Grating, LPFG) 作为一种具有带阻滤波特性的器件是目前的研究热点. 与短周期的布喇格 (Bragg) 光纤光栅不同的是, 长周期光纤光栅周期很长 (约在 100 μm 以上), 制作方法灵活多变^[1,2], 加上器件本身具有插入损耗小, 后向反射低, 可靠性好, 与偏振无关, 色散极低, 体积小等优点, 它正在引起人们更多地关注. 传统的紫外光方法制作的 LPFG 成本较高, 在温度和应力的作用下器件性能不稳定; 本文用连续 CO₂ 激光脉冲制作 LPFG, 具有设备简单, 所使用的是标准普通单模通信光纤, 写入步骤简明, 制作成本低廉, 写入前光纤无需敏化. 所制成的光栅还具有温度漂移小的优点, 故它具有良好的商业应用前景^[1,3-7]. 而近年的研究表明, CO₂ 激光制作的长周期光纤光栅温度稳定性尤为突出^[8].

1 理论分析和数值计算

本文主要采用耦合模理论对长周期光纤光栅进行分析^[9-11]. 在长周期光纤光栅中, 芯层中传输的导波光 (基模 LP₀₁) 与同向的包层的辐射模 (LP_{0m}) 发生耦合, 所以它是一种波长相关的损耗器件.

一般情况下, 聚焦 CO₂ 激光照射引起的折射率变化相对于紫外光敏性导致的折射率变化大得多, 有报道^[4] 在光纤产生微小形变的情况下得出约有 0.1 的折射率变化. 在我们的实验中没有进行折射率分布变化的测量, 但是在控制条件的选取上使得折射率变化尽量大而不致引起光纤不通光 (不产生大的形变), 因而可以认为是强耦合型的光栅^[10]. 理论上我们也采用较大的折射率变化进行计算.

由长周期光纤光栅的耦合模方程^[9]

$$\frac{dR(z)}{dz} = i\sigma R(z) + i\kappa S(z) \quad (1)$$

$$\frac{dS(z)}{dz} = -i\sigma S(z) + i\kappa^* R(z) \quad (2)$$

式中 $R(z)$ 表示芯层导模场的慢变振幅, $S(z)$ 表示包层模场的慢变振幅, σ 和 κ 分别表示自耦合系数和互耦合系数.

根据耦合模理论, 长周期光纤光栅将芯层的光耦合至包层传输, 随着光栅长度的增加, 光波将在芯层和包层之间来回耦合 (如图 1).

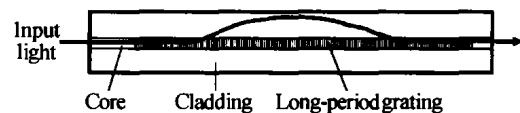


图 1 长周期光纤光栅中耦合情况示意图
Fig. 1 Mode coupling in LPFG

我们仅考虑 LP₀₁ 和 LP₀₂ 两种模式的作用, 且仅考虑均匀光栅, 周期 $\Lambda = 677 \mu\text{m}$, CO₂ 激光写入引起的折射率变化取成 $\Delta n = 0.01$, 平常紫外光方法写入的取成 $\Delta n = 0.0016$, 其中设定的光纤参数为芯层半径 $r_{co} = 2.625 \mu\text{m}$, 包层半径 $r_{cl} = 62.5 \mu\text{m}$, 芯层折射率 $n_{co} = 1.458$, 包层折射率 $n_{cl} = 1.450$, 空气层 $n_{ax} = 1$, 中心波长 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$. 根据耦合模理论计算得到的结果, 我们可以做出 70 个周期 ($L = 47390 \mu\text{m}$) 的光栅的光谱图 (图 2), 以及模式间耦合情况随光栅长度的变化 (图 3).

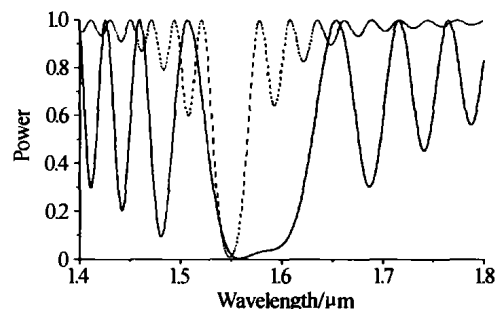


图 2 光栅的传输光谱图
Fig. 2 The transmission spectrum of the grating

*国家自然科学基金 (批准号 60178001、10074046) 资助项目
Tel: 021-54744088 Email: yanming@sjtu.edu.cn
收稿日期: 2004-03-23

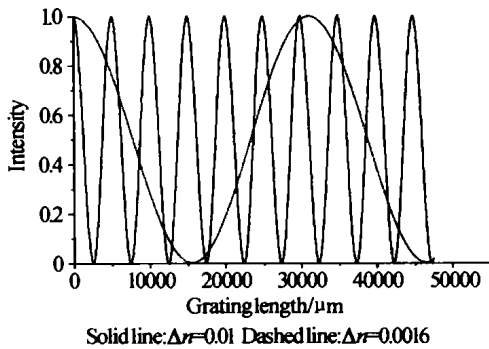


图3 光栅耦合情况同光栅长度的关系
Fig.3 The relation between mode coupling and grating length

通过对两种折射率变化相差几乎一个量级的光栅传输情况的模拟,可以看出,强耦合型光栅($\Delta n = 0.01$)较之弱耦合型光栅($\Delta n = 0.0016$),主峰的线宽 FWHM 比较大,旁瓣效应很明显(图 2).在整个光栅长度上包层模式和芯层模式之间经历了较多次数的相互耦合周期(光从芯层耦合到包层然后完全耦合回来称为一个耦合周期见图 3,因而强耦合型 LPFG 更适宜于用作模式耦合器件.

2 实验装置和结果

CO_2 激光是一种新的制作长周期光纤光栅的光源^[2-6,11],采用逐点写入法.本实验采用波长为 $10.6 \mu\text{m}$ 的 CO_2 激光作为刻写光源,激光经过全反镜和凸透镜后,被聚焦到置于精密电控移动平台上的普通单模通信光纤上,在光纤侧面逐点刻写,同时在光纤两端加上 ASE(放大的自发辐射)光源和光谱分析仪,以便实时监控刻写的情况.测试系统是加拿大 EXPO 公司的光无源测试系统,采用型号

为 IQ-2300 的 ASE 源作检测光源(约 $1520 \sim 1560 \text{ nm}$),型号为 IQ-5320 的多波长计做光谱测试.光纤采用康宁公司(Corning Corp.)的 G652 型 SMF28 普通单模通信光纤.

未经曝光处理光纤的传输谱线如图 4.图中纵向表示光强,每格为 5.00 dB .此谱线也是 ASE 光源的谱线,谱宽约 40 nm .

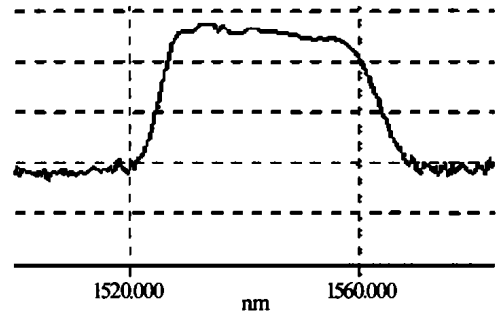


图4 未曝光的光纤传输谱线图
Fig.4 The transmission spectrum of standard fiber

由于聚焦的 CO_2 激光功率密度很大,曝光时间的选取尤为重要,曝光时间过长会导致光纤表面形变严重而致不通光,时间太短会使得折射率几乎没有变化,一般曝光时间应选在 1 s 以内.实验中尽量使得折射率变化较大,这样由前面的理论计算可知,在较短的光栅长度内就可以观测到周期性模式耦合的情况.

我们对光纤采用逐点曝光法,激光功率为 0.65 W ,光斑直径 $250 \mu\text{m}$,曝光时间 0.5 s ,曝光距离间隔(即光栅周期) $625 \mu\text{m}$,对每一步曝光形成的光纤传输谱都进行了检测.随着光栅长度的增加,光谱按图 5(a)~(f)所示的规律变化.

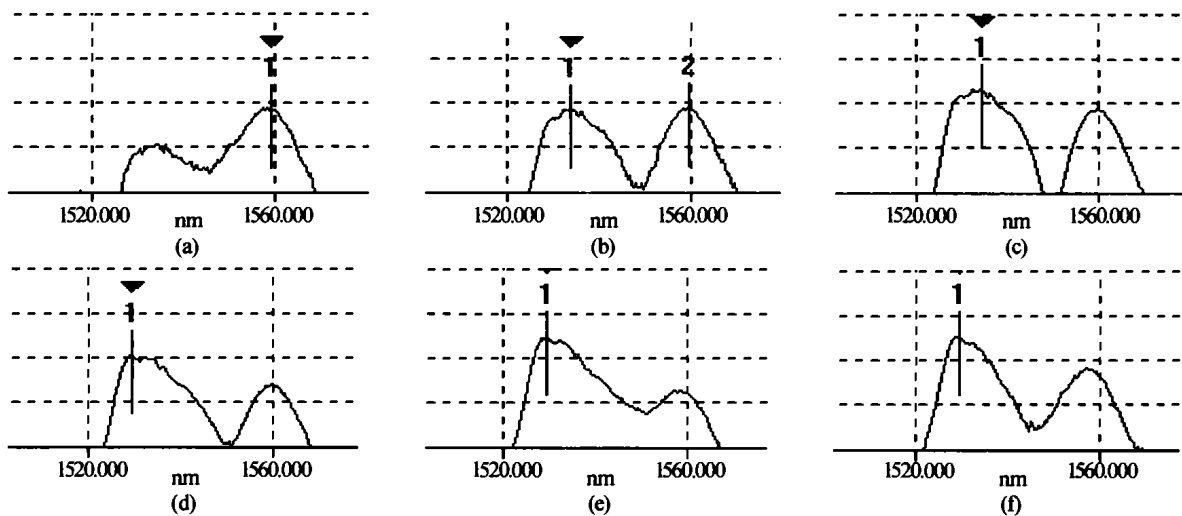


图5 不同长度光栅的传输光谱
Fig.5 Transmission spectrum of gratings with different length

起初,随着光栅长度的增加,阻带峰(凹陷)逐渐变深变窄[图(a)~(c)].在写入 15 个周期后,两个模式耦合达到最大[如图 5(c)],出现最深的阻带峰;尔后,随光栅长度的进一步增加,谱线的阻

带峰交替地变深和变浅.这些变化规律性地与上面的耦合模理论(图 3)一致.

制作完成以后,得到 37 个光栅周期,总的光栅长度为 $23125 \mu\text{m}$,实验在更宽的范围内进行光谱测

量,发现在 1200 ~ 1600 nm 范围内共有 6 个阻带峰,其中心波长分别为:1400 nm,1442 nm,1462 nm,1508 nm,1548 nm,1582 nm.

3 结论

从实验结果的分析得出以下的结论:

1) 引起折射率变化的关键因素是聚焦点的光强和曝光时间.

2) 光栅传输光谱的测量结果与理论计算相符,光栅谱线的主峰随着光栅长度的增加出现强弱变化,这种强弱变化反映了 LPFG 中的模式耦合.

3) 宽带光谱的测量结果表明 LPFG 的光谱是芯层模和多个包层模耦合形成的.

参考文献

- 1 Davis D D, Gaylord T K, Glytsis E N, *et al.* Long-period fiber grating fabrication with focused CO₂ laser pulses. *Electron Lett*, 1998, **34**(3): 302 ~ 303
- 2 胡爱姿, 饶云江, 聂知理, 等. 腐蚀后的新型长周期光纤光栅特性研究. *光子学报*, 2004, **33**(8): 916 ~ 919
Hu A Z, Rao Y J, Nie Z L, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(8): 916 ~ 919
- 3 Vengsarkar A M, Lemaine P J, Juellkins J B, *et al.* Long-period fiber gratings as band-rejection filters. *J Lightwave Technol*, 1996, **14**(1): 58 ~ 65
- 4 Poole C D, Presby H M, Meester J P. Two-mode fiber spatial-mode converter using periodic core deformation. *Electron Lett*, 1994, **30**(17): 1437 ~ 1438
- 5 VanWiggeren G D, Gaylord T K, Davis D D, *et al.* Tuning, Attenuating, and dwitching by controlled flexure of long-period fiber gratings. *Opt Lett*, 2001, **26**(2): 61 ~ 63
- 6 Rao Y J, Zhu T, Ran Z L, *et al.* Novel long-period fiber gratings written by high-frequency CO₂ laser pulses and applications in optical fiber communication. *Opt Commun*, 2004, **229**(1-6): 209 ~ 221
- 7 胡爱姿, 饶云江, 王义平, 等. 基于新型长周期光纤光栅的动态横向负荷传感器. *光子学报*, 2003, **32**(11): 1359 ~ 1362
Hu A Z, Rao Y J, Wang Y P, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(11): 1359 ~ 1362
- 8 Davis D D, Gaylord T K, Glytsis T K, *et al.* Very-high-temperature stable CO₂ laser-induced long-period fiber gratings. *Electron Lett*, 1999, **35**(9): 740 ~ 741
- 9 Erdogan T. Fiber grating spectra. *J Lightwave Technol*, 1997, **15**(8): 1277 ~ 1294
- 10 Erdogan T. Cladding-mode resonances in short- and long-period fiber grating filters. *J Opt Soc Am A*, 1997, **14**(11): 1760 ~ 1773
- 11 张自嘉, 施文康, 高侃, 等. 长周期光纤光栅(LPFGs)的谱结构研究. *光子学报*, 2004, **33**(11): 1308 ~ 1312
Zhang Z J, Shi W K, Gao K, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(11): 1308 ~ 1312

Long-period Fiber Gratings Fabricated by CW CO₂ Laser Pulses

Yan Ming, Luo Shouyu, Zhang Zhiming

Department of Physics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240

Received date: 2004-03-23

Abstract Long-period fiber gratings (LPFG) are fabricated by using CW CO₂ laser pulses, and transmission spectra are measured at different grating lengths. The coupling strength shows periodical variation versus the grating lengths. This conclusion is in agreement with the coupled mode theory.

Keywords Long-period fiber grating; Coupled mode theory; CW CO₂ laser pulses; Mode coupling



Yan Ming was born on October 12, 1980, in Ezhou, Hubei Province, China. He received the B. S. degree in physics from Shanghai Jiaotong University, in 2003. He is currently working towards the Ph. D. degree at Shanghai Jiaotong University. His current research interests include fiber grating, optical waveguides and optical communications.