

高频 CO₂ 激光脉冲写入长周期光纤光栅的方法

王义平¹, 饶云江²

(11 上海交通大学区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 上海 200030; 21 重庆大学光电工程学院, 重庆 400030)

摘 要: 在国际上首次提出了高频 CO₂ 激光脉冲写入长周期光纤光栅的方法. 该方法与低频 CO₂ 激光脉冲写入法或紫外光等其它写入法相比具有许多独特的优点))) 效率高、成本低, 重复曝光容易, 激光加热区域的周期性变化通过扫描振镜的偏振来实现而光纤固定不动, 因此特别适合于研制具有特殊用途的新型 LPFG. 详细分析了单侧 CO₂ 激光入射导致 LPFG 横截面折射率分布不均匀的形成机理并提出了降低 LPFG 双折射的方法.

关键词: 长周期光纤光栅; 光纤布拉格光栅; CO₂ 激光; 高频激光脉冲; 双折射

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2004) 08-1322-04

A Technique Fabricating Long Period Fiber Gratings by High-Frequency CO₂ Laser Pulses

WANG Yizping¹, RAO Yunjiang²

(11 State Key Laboratory on Local Fiber-Optic Communication Networks and Advanced Optical Communication Systems, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China; 21 Department of Optoelectronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: A technique fabricating long period fiber gratings (LPFGs) by high-frequency CO₂ laser pulses is proposed and demonstrated, for the first time, to our knowledge. In comparison with other fabrication techniques of LPFG, such as using low-frequency CO₂ laser and UV laser, such a technique has many unique advantages, including high efficiency, low cost, low insert loss, and repetitive exposure being easy. Exposing area of the fiber is transferred periodically by means of the scan lens turning. Then, it is especially propitious to developing novel LPFGs using the fabrication technique. It is analyzed that the single side incident CO₂ laser results in an asymmetric refractive index distribution, within the cross-section of the LPFG.

Key words: long period fiber grating; fiber Bragg grating; CO₂ laser; high-frequency laser pulses; birefringence

1 引言

长周期光纤光栅(Long period fiber grating: LPFG)是近几年才出现的一种新型光纤无源带阻型滤波器件. LPFG 具有插入损耗小、无后向反射、全兼容于光纤、体积小、能埋入智能材料等优点, 并且在某些方面具有比光纤布拉格光栅更好的光学特性, 因此在光纤通信和传感领域具有广泛的应用前景. LPFG 的写入方法很多, 常用的是利用氢载掺锗光纤光敏性的紫外光写入法^[1]. A M Vengsarkar 等人^[1,2]于 1996 年首先用该方法写入了世界上第一支 LPFG, 这标志着 LPFG 的诞生. 近年来, D D Davis^[3]等人提出的用 CO₂ 激光在普通单模光纤中写入 LPFG 的方法得到了广泛应用, 该方法不需要氢载光纤和模板, 成本低, 能随意改变写入周期. LPFG 的写入方法还有离子束入射法^[4]、电弧放电法^[5]、腐蚀刻槽法^[6]、机械微弯法^[7]和熔融拉锥法^[8]等方法, 这些方法各有优缺点, 都有待进一步完善.

本文首次提出了一种用计算机控制的高频 CO₂ 激光脉冲在普通单模光纤中写入 LPFG 的方法^[9], 该方法使用聚焦的高频脉冲、能量集中、加热效率高、对光纤结构的物理损伤小, 因此可以高效率、低成本地写入高质量的 LPFG.

2 高频 CO₂ 激光脉冲写入法

高频 CO₂ 激光脉冲写入 LPFG 的装置如图 1 所示: 把普通单模光纤水平直线状态置于 CO₂ 激光器 (SYNRAD INC, USA) 的聚焦透镜的焦点, 注意使光纤的轴线与 CO₂ 激光的焦斑重合. 为了提高写入效率, 通常预先把被加热段光纤的涂覆层剥去. 由于高频 CO₂ 激光加热过程中光纤可能会发生物理延长, 因此, 光纤的一端固

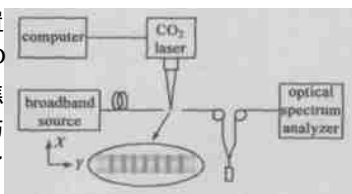
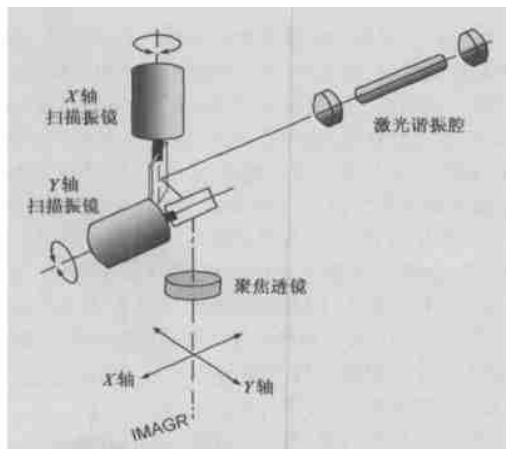


图 1 高频 CO₂ 激光脉冲
写入 LPFG 的装置图

图2 位于高频CO₂激光器前端的三维动态聚焦系统

定,另一端悬挂10g的轻物,以便使光纤在被加热期间保持恒定的轴向应力并始终处于直线水平状态。宽带光源(SLED1550S5A)作为输入,光谱仪(HP86140A)监测LPFG透射谱的变化。CO₂激光的焦斑直径可由图2所示的聚焦透镜调节,聚焦后的焦斑直径为50 μ m。全功率为10W的CO₂激光器由计算机控制,调节输出激光脉冲的各种参数(有效矢量步长、有效矢量步间延时、空矢量步长、空矢量步间延时、Q频率和Q释放时间)可实现对CO₂激光脉冲频率和能量的控制,从而在光纤中写入不同传输特性的LPFG。通常CO₂激光脉冲的频率设为5KHz,功率约为0.5W。由计算机控制的2D扫描振镜首先使CO₂激光光束沿横向(X)扫描光纤,然后使激光光束沿光纤轴向(Y)偏移一个光栅周期,再次扫描光纤,即激光光束沿Y方向每偏移一次就沿X方向扫描光纤一次,依次扫描完LPFG的每一个周期。这样光纤经聚焦的高频CO₂激光脉冲轴向周期性加热后,其折射率发生轴向周期性变化从而形成LPFG。通常一次扫描引起的折射率调制较低,因此一般要经过几次重复扫描才能写入一个合适的LPFG。用此方法在Corning SMF28光纤中写入的周期 $\Lambda = 420\text{nm}$,周期数 $N = 52$ 的LPFG的透射谱如图3所示,六个损耗峰从左至右分别对应纤芯基模

LP₀₁和包层模LP₀₂、LP₀₃、LP₀₄、LP₀₅、LP₀₆、LP₀₇的耦合,其谐振波长分别为12131.53nm、12321.64nm、12551.23nm、13021.86nm、13721.29nm、14931.7nm,幅值分别为-01.735dB、-11.251dB、-21.338dB、-31.732dB、-61.496dB、-81.843dB。由图3可知,该方法写入的LPFG的3dB带宽较窄,插入损耗低。实验表明该方法可写入谐振波长为1530nm,损耗峰幅值达21dB,3dB带宽只有15nm而插入损耗小于201.2dB的LPFG^[9]。

如图2所示,三维动态聚焦系统被安装在CO₂激光器的前端,根据聚焦透镜的具体位置,可以分为前聚焦和后聚焦两

种方式。前聚焦方式是将聚焦透镜置于振镜扫描器的前面,即聚焦透镜位于激光器扩束镜和振镜扫描器之间,优点是可选用普通聚焦透镜,价格低,且可获得较大的扫描范围;缺点是焦斑直径较大,透镜的焦点扫描轨迹是镜头后方的一个圆弧面,因此加热不均匀而且焦斑的重叠区域较大。后聚焦方式是将聚焦透镜置于振镜扫描器的后面,这种方式采用的聚焦透镜是专门设计的F2H平场透镜,不管光束如何移动,它的焦点位置始终保持在一个平面上,保证了在加热区域内焦斑大小和能量密度的一致,提高了写入LPFG的质量。此外,后聚焦方式使得更换聚焦透镜变得简单,可根据写入LPFG的具体要求随时更换聚焦透镜。因此我们采用后聚焦方式的三维动态聚焦系统。

我们采用专门的HAN S LASER Marking System 软件控制X轴和Y轴扫描振镜的偏转,从而使激光光束偏转,进而实现对光纤的周期性加热。在使用高频CO₂激光脉冲写入LPFG时,只要用CoreDraw软件或AutoCAD软件简单地画出如图4所示的CO₂激光光束扫描轨迹,计算机就可以自动控制CO₂激光光束逐步扫描即加热光纤,从而在光纤中写入相应的均匀LPFG、啁啾LPFG和倾斜LPFG;相反,如果用其它写入方法,其写入装置和写入过程就要复杂得多。

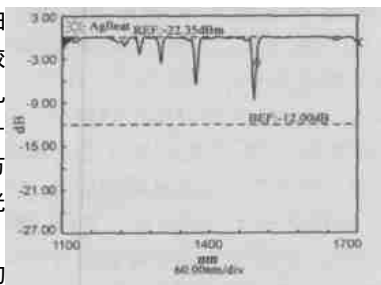


图4 用CoreDraw软件绘制的激光光束的扫描轨迹,写入的光栅分别对应(a)均匀LPFG;(b)啁啾LPFG;(c)倾斜LPFG

3 高频CO₂激光脉冲写入法与其它写入法的区别

文献[3]中使用的CO₂激光脉冲的周期约几赫兹(低频CO₂激光脉冲写入法),而我们使用的CO₂激光脉冲的周期约5KHz(高频CO₂激光脉冲写入法),这是本文介绍的CO₂激光写入方法与其它CO₂激光写入法的最重要区别之一。此外,本文的写入装置中加入了后聚焦方式的三维动态聚焦系统,以致CO₂激光聚焦后的焦斑直径较小,约为50 μ m,而其它CO₂激光写入法的激光焦斑直径约为140 μ m^[3]。高频CO₂激光脉冲写入法利用高频脉冲的热冲击效应,脉冲能量集中、单个脉冲加热时间短、加热效率高,对光纤结构的物理损伤小,因此,该方法能够高效率、低成本地写入高质量的LPFG。

低频CO₂激光写入方法中不同周期的曝光是通过机械式步进装置移动光纤实现的^[3],由于移动装置精度的限制,每个LPFG的制作一般是一次曝光完成的,因此一旦曝光,光栅的透射谱就确定了,即透射谱很难通过多次重复曝光而改变。相反,我们的方法中光纤是固定的,写入过程中不须用步进装置移动光纤,激光加热区域的周期性变换通过计算机控制的扫描振镜的偏转来实现,并使用后聚焦方式的三维动态聚焦系统,从而使得光纤始终处于激光束的焦平面,以致加热过程更加稳定,不同周期的受热更加均匀。其最大的优点是重复曝光非常容易,并且加热区域可以精确重叠,因此可以通过多次重复曝光而写入具有特定透射谱的LPFG。在写入过程中用光谱仪观察透射谱的变化,每一次曝光就使损耗峰的幅值增加一

图3 高频CO₂激光脉冲写入的LPFG透射谱图

点,一旦损耗峰幅值达到要求就停止曝光.通过多次探索,合理设置写入参数,控制 CO₂ 激光脉冲的频率和能量亦可实现一次曝光就写入需要的 LPFG.因此这种方法非常适合于研制具有特殊透射谱特性的新型 LPFG,从而降低研制成本.

紫外光在光敏光纤中写入 LPFG 时,随着损耗峰的增长,谐振波长逐渐向长波或短波方向漂移^[10].然而用高频 CO₂ 激光脉冲在普通单模光纤中写入 LPFG 时,在损耗峰增长的同时谐振波长几乎不变并且损耗峰的 3dB 带宽逐渐减小,这是高频 CO₂ 激光脉冲写入法与其它写入法的又一个重要区别,并且也是一个很好的优点,因为写入过程中谐振波长不变就很容易通过设计合适的光栅周期来控制 LPFG 的谐振波长.实验表明,当用高频 CO₂ 激光脉冲在氢载光敏光纤中写入 LPFG 时,随着损耗峰的增长,谐振波长向长波或短波方向逐渐漂移,其现象与紫外光在光敏光纤中写入 LPFG 类似.

LPFG 写入过程中谐振波长 K_{res}^m 可表示为^[10]

$$K_{\text{res}}^m = (n_{\text{eff}}^0 - n_{\text{eff}}^{\text{d},m}) C \left[1 + \frac{(D_{\text{eff}}^0 - D_{\text{eff}}^{\text{d},m}) \frac{dK_{\text{D}}^m}{dC}}{(n_{\text{eff}}^0 - n_{\text{eff}}^{\text{d},m})^2} \right] \quad (1)$$

式中 n_{eff}^0 和 $n_{\text{eff}}^{\text{d},m}$ 分别为纤芯基模有效折射率和一阶 m 次包层模有效折射率, D_{eff}^0 和 $D_{\text{eff}}^{\text{d},m}$ 分别为纤芯基模有效折射率变化和一阶 m 次包层模有效折射率变化, K_{D}^m 为对应一阶 m 次包层模的设计波长, C 为光栅周期.紫外光写入 LPFG 时谐振波长变化的主要原因是 D_{eff}^0 和 $D_{\text{eff}}^{\text{d},m}$, 以致 $D_{\text{eff}}^{\text{d},m}$ 可以忽略,所以由式(1)可知,随着 D_{eff}^0 的增大,谐振波长 K_{res}^m 将发生变化,变化的方向与光纤类型和包层模的次数 m 有关.高频 CO₂ 激光在普通光纤中写入 LPFG 时,纤芯基模有效折射率和包层模有效折射率可能同时变化,以致于 D_{eff}^0 和 $D_{\text{eff}}^{\text{d},m}$ 可能相近,因此,由式(1)可知在光栅写入过程中谐振波长 K_{res}^m 几乎不变,而只是损耗峰幅值逐渐增加.当用高频 CO₂ 激光在氢载光敏光纤中写入 LPFG 时,由于纤芯载氢的原因,折射率调制主要集中在纤芯 ($D_{\text{eff}}^0 \gg D_{\text{eff}}^{\text{d},m}$), 因此与紫外光写入法类似,随着损耗峰的增长,谐振波长 K_{res}^m 将发生变化.

4 LPFG 横截面折射率分布的非均匀性

用 CO₂ 激光写入 LPFG 时,单侧入射的 CO₂ 激光在光纤表面同时产生反射和透射.由于 SiO₂ 对 10.6 μm 波长处的激光吸收较强,使得透射光的能量沿激光入射方向逐渐减弱,以致在光纤面向激光入射的一侧 CO₂ 激光的能量较强,而在背向入射方向的一侧 CO₂ 激光的能量较弱. G. G. Van Wiggeren 等人^[11] 计算了单侧入射的 CO₂ 激光在直径的 $D = 125 \mu\text{m}$ 单模光纤横截面的能量分

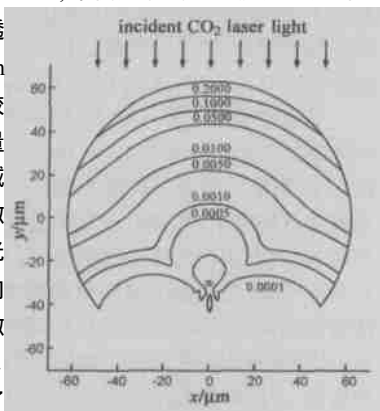


图5 单侧入射的 CO₂ 激光 ($K = 10.6 \mu\text{m}$) 在光纤横截面的能量分布(相对于单位入射能量)

布,如图5所示,图中的能量值相对于单位入射能量, x 轴和 y 轴表示光纤的径向.由图5可知,单侧入射的 CO₂ 激光在光纤表面的反射较大,只有 20% 透射到光纤中,并且由于 SiO₂ 的吸收作用,激光能量逐渐减弱,在背向激光入射的一侧激光能量几乎为零,从而导致在光纤横截面上因 CO₂ 激光加热而引起的折射率调制不均匀.在光纤面向激光入射的一侧,激光能量较强,温度较高,残余应力释放较多,因此折射率变化较大;而在光纤背向激光入射方向的一侧,激光能量较弱,温度较低,残余应力释放较少,因此折射率变化较小.纤芯和包层都有折射率变化. CO₂ 激光加热处光纤横截面折射率分布如图6所示,面向激光入射的一侧(颜色深的部分)表示折射率变化大,背向激光入射的一侧(颜色浅的部分)表示折射率变化小.高频 CO₂ 激光脉冲写入的 LPFG 横截面折射率分布不均匀导致具有不同偏振态的输入光的光程不同,从而使得该 LPFG 具有一定的偏振相关性^[12].实验表明正是因为横截面折射率分布的不均匀性使得这种 LPFG 的弯曲、扭曲和横向负载特性具有明显的方向相关性^[9,13],而这些特性在光纤通信和传感领域具有独特的应用.

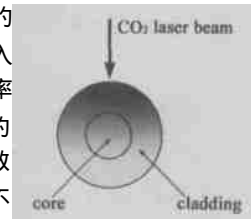


图6 CO₂ 激光写入的 LPFG 的截面折射率分布示意图,颜色深的部分表示折射率变化大,颜色浅的部分表示折射率变化小

激光曝光写入的 LPFG 的双折射主要包括两个方面,一方面是光纤自身的模式双折射,即偏振模色散,其起因是光纤纤芯的非圆性,即光纤拉制过程中遗留的椭圆变形;另一方面是激光诱导折射率调制引起的双折射,其起因有两个,一个可能的原因是单侧曝光导致光栅折射率横截面分布的不均匀,另一个可能的原因是与诱导折射率调制的激光(紫外光)的偏振方向相关的双折射^[14]. CO₂ 激光写入的 LPFG 的双折射最主要的原因可能是单侧曝光导致的折射率横截面分布不均匀^[12].对于一些要求 LPFG 具有较低双折射的场合,可用双侧加热法极大地降低单侧 CO₂ 激光加热引起的双折射.首先对光纤的一侧曝光,当 LPFG 的损耗峰增长到一定程度后,把光纤绕轴线旋转 180°,然后对另一侧曝光,注意旋转光纤时应保证光纤没有轴向移动,并且两次曝光的时间、激光的能量和频率等参数应相同以确保光纤同一位置的两侧被对称加热.

5 结论

高频 CO₂ 激光脉冲轴向周期性加热光纤通过残余应力释放引起光纤折射率发生轴向周期性调制从而写入 LPFG.与低频 CO₂ 激光脉冲写入法和紫外光等其它写入法相比该方法具有许多独特的优点:(1)使用聚焦的高频激光脉冲、能量集中、加热效率高、对光纤结构的物理损伤小、无需高成本的氢载光纤;(2)激光加热区域的周期性变换通过计算机控制的扫描振镜的偏转来实现而光纤固定不动,重复曝光容易,从而克服了低频 CO₂ 激光脉冲写入法需要高精度的机械位移装置和紫外光等其它写入法需要昂贵的模板的不足;(3)光栅写入过程

中, 谐振波长几乎不变, 便于实现对光栅透射谱的谐振波长和幅值等参数的控制和优化; 因此, 该方法可以高效率、低成本地写入满足要求的 LPFG, 特别适合于研制具有特殊透射谱特性的新型 LPFG. CO₂ 激光的单侧入射引起 LPFG 横截面折射率分布不均匀)) 激光入射的一侧折射率调制较大, 而背向激光入射的一侧折射率调制较小, 从而导致这种 LPFG 具有独特的弯曲、扭曲和横向负载特性. 因此, 高频 CO₂ 激光脉冲写入的新型 LPFG 可望在光纤通信和传感领域获得广泛应用.

参考文献:

- [1] 陈根祥, 李洵, 杨玲, 简水生, 葛璜, 胡雄伟, 王圩. 光纤的光敏特性及光纤光栅紫外写入技术[J]. 电子学报, 1997, 25(8): 73-77.
- [2] Vengsarkar A M, Lemaire P J, Judkins J B, Bhatia V, Erdogan T, Spie J E. Long-period fiber gratings as band-rejection filters[J]. J Lightwave Technol, 1996, 14(1): 58-65.
- [3] Davis D D, Gaylord T K, Glytsis E N, Kosinski S G, Mettler S C, Vengsarkar A M. Long-period fibre grating fabrication with focused CO₂ laser pulses[J]. Electronics Lett, 1998, 34(3): 302-303.
- [4] Fujimaki M, Ohki Y. Fabrication of long-period fiber gratings by use of ion implantation[J]. Opt. Lett, 2000, 25(2): 88-89.
- [5] In Kag Hwang, Seok Hyun Yun, Byoung Yoon Kim. Long period fiber gratings based on period micobends[J]. Opt. Lett, 1999, 24(18): 1263-1265.
- [6] Lin C Y, Wang L A. Loss-tunable long period fibre grating made from etched corrugation structure[J]. Electronics Lett, 1999, 35(21): 1872-1873.
- [7] Yokota M, Oka H, Yoshino T. Mechanically induced long period fiber grating and its application for distributed sensing[A]. OFS. 2002[C]. Portland Oregon, USA, 2002. 135-138.
- [8] Karpov V I, Grekov M V, et al. Mode-field converters and long-period gratings fabricated by thermodiffusion in nitrogen-doped silica-core fibers[A]. OFC. 98[C]. San Jose California, USA, 1998. ThG3, 279-280.
- [9] Yun-Jiang Rao, Yi-Ping Wang, Zeng-Ling Ran, Tao Zhu. Novel fiber-optic sensors based on long-period fiber gratings written by high-frequency CO₂ laser pulses[J]. J. of Lightwave Technology, 2003, 21(5): 1320-1327.
- [10] MacDougall T W, Pilevar S, Haggans C W, Jackson M A. Generalized

expression for the growth of long period gratings[J]. IEEE Photonics Technology Lett, 1998, 10(10): 1449-1451.

- [11] VanWiggeren G D, Gaylord T K, Davis D D, Anemogiannis E, Garrett B D, Braiwich M I, Glytsis E N. Axial rotation dependence of resonances in curved CO₂-laser-induced long-period fibre gratings[J]. Electron. Lett, 2000, 36(16): 1354-1355.
- [12] Hyung Suk Ryu, Yongwoo Park, Seong Tae Oh, Youngjoo Chung, Dug Young Kim. Effect of asymmetric stress relaxation on the polarization-dependent transmission characteristics of a CO₂-laser-written long-period fiber grating[J]. Opt. Lett, 2003, 28(3): 155-157.
- [13] Yi-Ping Wang, Yun-Jiang Rao, Zeng-Ling Ran, Tao Zhu, Ai-Zi Hu, A Novel Tunable Gain Equalizers Based on a Long-Period Fiber Grating Written by High-Frequency CO₂ Laser Pulses[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2003, 15(2): 251-253.
- [14] Meyer T, Nicati P A, Robert P A, Varelas D, Limberger H G, Salathe R. Birefringence writing and erasing in ultra-low-birefringence fibers by polarized UV side-exposure: origin and applications[A]. 11th OFS[C]. Sapporo, Japan 1996, We5-1, 368-371.

作者简介:



王义平 男, 1971 年 7 月出生于重庆市, 博士、IEEE 会员, Optical Society of America (OSA) 会员, 现在上海交通大学电子科学与技术博士后流动站做博士后, 2003 年 7 月获重庆大学光学工程专业博士学位, 2000 年 6 月获重庆大学精密仪器及机械专业硕士学位, 攻读博士学位期间主要从事长周期光纤光栅方面的研究工作, 目前主要从事具有电光效应的聚合物波导光栅和波长变换光开关方面的研究工作, 已在国际、国内一级刊物和国际会议上发表论文 36 篇 (SCI 10 篇, EI 32 篇, ISTP 12 篇). Email: wangyp@sjtu.edu.cn.

饶云江 男, 1962 年 6 月出生, 博导、教授、International Society for Optical Engineers(SPIE)会员、Optical Society of America (OSA) 会员, 1990 - 1999 年在英国从事光纤技术方面的研究, 1999 年聘为国家教育部首批长江特聘教授, 2000 年获得国家杰出青年科学基金, 2001 年获得中国光学学会/王大珩光学奖, 目前在重庆大学从事光纤通信与传感方面的研究工作, 撰写英国出版的光纤传感技术系列专著三章, 共计发表学术论文 100 余篇, 其中 44 篇论文被 SCI 核心杂志收录, 3 篇为国际知名杂志特邀综述文章.