

文章编号: 0258-7025(2009)11-2978-05

近红外飞秒脉冲激光制作光纤光栅的研究

王月珠 王 巍* 张云军 宋成伟 姚宝权 鞠有伦

(哈尔滨工业大学可调谐气体激光技术国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 根据近红外飞秒激光有大的空间相干尺寸和相位掩模衍射光的级次走离效应,运用双光束干涉原理分析了光纤纤芯处干涉光强的分布,同时运用波长 800 nm 飞秒激光在没有经过光敏性处理的掺铥光纤上制作了光纤布拉格光栅,最后把理论分析的结果与实验现象进行了比较。

关键词 光栅; 相位掩模; 飞秒激光; 光纤布拉格光栅; 空间相干性; 级次走离效应; 双光束干涉

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093611.2978

Theory Analysis of Fiber Grating Production Using Infrared Femtosecond

Wang Yuezhu Wang Wei Zhang Yunjun Song Chengwei Yao Baoquan Ju Youlun

(National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract Infrared femtosecond laser has highly spatial coherence, and order walk-off will happen behind the phase mask. In this paper, the interference patterns in the core are modeled by using two beam interference theory, and fiber Bragg gratings are fabricated in the unphotosensitive Tm-doped fibers using 800 nm femtosecond radiation. In the end, the simulative results are compared with the experimental results.

Key words gratings; phase mask; femtosecond laser; fiber Bragg grating; spatial coherence; order walk-off; two-beam interference

1 引 言

光纤光栅是一种新型的光无源器件,在光纤通信、光纤传感和光信息处理等^[1~3]领域有着广泛的应用。传统的光纤光栅是利用紫外光照射经过光敏处理后的光纤而形成的,近年来,有人提出了运用飞秒激光刻写光纤光栅。2003年, Mihailov 等^[4,5]利用波长为 800 nm 的红外飞秒激光与相位掩模在标准 SMF-28 通信光纤上制作了高阶布拉格光栅,光栅在制作时不需要对光纤进行任何光敏处理,光纤折射率调制达到了 10^{-3} 量级。2005年,该研究团队利用同样的方法刻写出了两种不同类型的光栅: Type I-IR 光栅和 Type II-IR 光栅^[6], Type I-IR 产生在介质的损坏阈值下,其形成与非线性吸收过程有关; Type II-IR 形成时伴有连续谱的产生,这种类

型的光栅在温度超过 1000 °C 时仍然是稳定的,它可能是介质发生电离后损坏的结果。2006年, Grobnc 等^[7]在单模和多模非掺杂氟化物光纤上采用 800 nm 的飞秒激光和相位模板写入光纤布拉格光栅(FBG),折射率调制量达到 2.0×10^{-4} 。氟化物光纤由于对近紫外到中红外的波段均是透明的,使其成为可见和中远红外波段光纤激光器的理想基质,但由于氟化物光纤对普通紫外光无光敏性,长期以来,人们试图用传统的办法在该种光纤上刻出光纤布拉格光栅的努力均告失败,用飞秒激光照射相位掩模法成功使得人们对氟化物光纤激光器及放大器的研究又重新燃起希望。2007年, Mihailov 等^[8]利用近红外飞秒光透过光纤的聚合物覆层在氢载的光纤上刻写了光栅,折射率调制量达到 $3.5 \times$

收稿日期: 2009-02-09; 收到修改稿日期: 2009-03-05

作者简介: 王月珠(1942—),女,教授,博士生导师,主要从事红外固体激光技术和非线性光学技术等方面的研究。

E-mail: juy1@hope.hit.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: gggmtvmw@163.com

10^{-4} 。由于刻写不需要去掉光纤的聚合物保护层,这样能使光纤有很好的机械强度,同时也大幅度减少了制作的成本和时间。除了近红外飞秒激光的使用,Dragomir 等^[9]利用 264 nm 的紫外飞秒激光与相位掩模分别在 SMF-28 和 Nufern GF₁ 光纤上制作了布拉格光栅,折射率调制量达到 10^{-3} 量级。Stephen 等^[10]运用同样的方法在不同的光敏光纤和通信光纤上制作布拉格光栅,折射率调制程度依赖于入射光的能量。从 2003 年到现在,飞秒相位掩模刻写布拉格光栅由于具有容易控制、精确度高、制作时不需要对光纤进行特殊光敏处理、制作的光栅折射率调制度高、热稳定性强等优点,它已经成为制作光谱质量好、高热稳定性光栅的最经济实用的方法之一。

2 理论分析

图 1 所示为飞秒相位掩模刻写的实验装置图^[11]。 $\lambda/2$ 波片和偏振片的作用是控制刻写飞秒脉冲的能量,柱透镜起光束压缩聚焦的作用,PM 为相位掩模,相位掩模经过特殊的设计,±1 级衍射光的光强最大并且相等,0 级衍射光的光强比较小。其他级次如±2 级,±3 级衍射光的光强更小,可以忽略不计。正入射的飞秒激光先经过柱透镜压缩,然后再经过相位掩模衍射,得到的衍射光在光纤纤芯处通过干涉刻写布拉格光栅。装置通过宽带光源和光谱仪在线监测光栅刻写的过程,运用计算机控制平移台可以实现动态刻写光纤光栅,从而增加光纤光栅的刻写长度,提高反射效率。传统的光纤光栅的制作是通过光敏光纤对紫外光的感光作用而对纤芯的折射率进行调制,飞秒激光制作光纤光栅的机理则完全不同,光栅的形成是由于材料的非线性吸收作用。非线性吸收作用促使电子从价带跃迁到导带,从而把激光的能量沉淀到材料中。在非线性吸

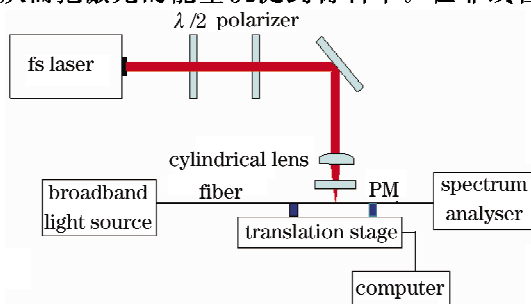


图 1 光纤布拉格光栅刻写的实验装置图

Fig. 1 Experimental setup for the inscription of the fiber Bragg grating

收过程中,“雪崩电离”和“光致电离”这两种类型的非线性激发作用是十分重要的。如果足够的激光能量通过这些非线性吸收作用沉积到材料中,材料就会产生永久性损伤,从而对材料的折射率进行调制。

2.1 空间相干性和衍射级次走离效应

相位掩模刻写布拉格光栅,光源的空间相干性对刻写有十分重要的影响。使用准分子紫外激光刻写布拉格光栅时,由于准分子光源的空间相干尺寸比较小,一般小于 $300 \mu\text{m}$ ^[12],刻写时光纤与相位掩模的距离不能太远,随着两者之间距离的增加,干涉条纹的可见度会迅速降低,制作的布拉格光栅质量会迅速下降。干涉条纹可见度不降低时,相位掩模与光纤之间的最大距离为^[12]

$$D_{\text{PM-f}} = \frac{L_{\text{coh}}}{2 \tan \theta}, \quad (1)$$

其中 L_{coh} 是光源的空间相干尺寸, θ 为相位掩模各级衍射光的衍射角。各级衍射光的衍射角为^[12]

$$\sin \theta = n \frac{\lambda}{\Delta_{\text{PM}}} \quad n = 0, \pm 1, \quad (2)$$

式中 λ 表示入射光的波长, Δ_{PM} 为相位掩模的周期, n 为衍射光的级次,比 1 更高的级次可以忽略不计。对于波长为 248 nm 的准分子激光源,相位掩模的周期为 $1.07 \mu\text{m}$,通过上述公式的计算可以得到 1 级衍射光的衍射角为 13.4° ,最大的距离为 $600 \mu\text{m}$ 。而飞秒激光,由于其空间相干性远比准分子激光器高^[13],所以相位掩模与光纤之间的距离可以远远大于准分子激光的。例如,对于波长 800 nm 的飞秒激光,相位掩模的周期为 $3.21 \mu\text{m}$ 。1 级衍射光的衍射角为 14.4° ,这个角度与上面准分子光源的相差不大,但是在光纤与相位掩模相距 6 mm 时仍然能刻写上条纹可见度很好的布拉格光栅,这个距离是准分子激光的 10 倍^[14,15]。增加相位掩模和光纤之间距离对于刻写是十分有利的,相位掩模和光纤都由玻璃制成,如果相位掩模与光纤离得太近将会损坏相位掩模。另外,增加相位掩模与光纤之间的距离可以形成对飞秒相位掩模刻写极其重要的衍射级走离效应^[14],得到纯的双光束干涉,以提高布拉格光栅的质量。

衍射级走离效应是从光源的时间相干性来考虑干涉的,可以用图 2 所示的简单的几何模型来理解^[16]。

从图 2 可以看出,±1 级衍射光与 0 级衍射光相比将以较大角度传输,因此到达光纤的纤芯需要更多的时间,设±1 阶衍射光到达纤芯所走的距离

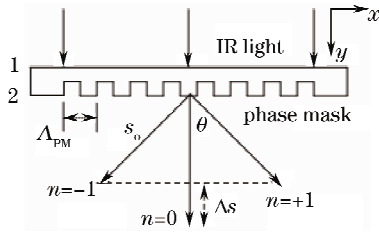


图 2 衍射级次走离效应示意图

Fig. 2 Λ geometrical explanation of the order walk-off after a phase mask

为 s_0 , 则 ± 1 阶衍射光与 0 阶衍射光到达纤芯所走的距离差为

$$\Delta s = s_0(1 - \cos \theta), \quad (3)$$

取 l_{coh} 为时间相干长度, 若 $\Delta s > l_{\text{coh}}$, ± 1 阶衍射光便不会与 0 阶衍射光在纤芯处相遇, 从而不能产生干涉, 此时只有 ± 1 级衍射光在纤芯处产生干涉, 能够得到较高衬比度的干涉条纹。可计算得到此时光纤与相位掩模之间的距离 L 应满足

$$L > \frac{l_{\text{coh}} \cos \theta}{1 - \cos \theta}. \quad (4)$$

2.2 纤芯处的光强度分布

如图 2 所示, 为了分析简单, 设相位掩模前表面 1 的光场是单位振幅, 相位为零的平面波。相位掩模对光强的吸收忽略不计, 假定掩模齿槽部分宽度相等, 在一个周期内其透过率函数为

$$t(x) = \begin{cases} \exp(i\varphi_1) & \Delta_{\text{PM}}/4 < x < 3\Delta_{\text{PM}}/4 \\ \exp(i\varphi_2) & -\Delta_{\text{PM}}/4 < x < \Delta_{\text{PM}}/4 \end{cases}, \quad (5)$$

式中 φ_1, φ_2 分别为光波经过相位掩模齿和槽后产生的相位延迟。相位掩模后表面 2 的近场光场可表示为

$$E(x) = \exp(i2\pi x \sin \theta_i / \lambda) t(x), \quad (6)$$

$\exp(i2\pi x \sin \theta_i / \lambda)$ 是平面光波以角度 θ_i 入射到掩模上形成的相位分布, 由于正入射 $\theta_i = 0^\circ$, $E(x)$ 简化为 $E(x) = 1 \cdot t(x)$, 将 $E(x)$ 傅里叶级数展开

$$E(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n \exp(i2n\pi x / \Delta_{\text{PM}}), \quad (7)$$

展开系数

$$C_n = \frac{1}{\Delta_{\text{PM}}} \int_0^{\Delta_{\text{PM}}} t(x) \exp(-i2n\pi x / \Delta_{\text{PM}}) dx, \quad (8)$$

积分后得到

$$C_0 = \frac{1}{2} [\exp(i\varphi_1) + \exp(i\varphi_2)], \quad (9)$$

$$C_n = \frac{\sin(n\pi)}{n\pi} [\exp(i\varphi_1) - \exp(i\varphi_2)]$$

$$n = \pm 1, \pm 2, \quad (10)$$

则可以得到各级衍射光波的相对光强分别为

$$I_0 = |C_0|^2 = \frac{1}{2} [1 + \cos(\varphi_1 - \varphi_2)], \quad (11)$$

$$I_n = |C_n|^2 = \frac{2\sin^2(n\pi)}{(n\pi)^2} [1 + \cos(\varphi_1 - \varphi_2)]. \quad (12)$$

光垂直正入射到相位掩模前表面 1 时, 合理地设计相位掩模参数使 $\varphi_1 - \varphi_2 = \pi$ 时, 由(11)式可知零级衍射光的强度为零, 但是在相位掩模的实际制作中不可能设计得如此完美, 所以零级衍射光的存在是不可避免的。根据前面对走离效应的分析, 只需要使光纤到相位掩模的距离 L 满足(4)式, 此时将得到纯的 $+1$ 级衍射光和 -1 级衍射光, 两束光在光纤纤芯位置发生干涉, 零级衍射光不与 ± 1 级衍射光发生干涉。设这两级衍射光在相位掩模后表面 2 的复振幅分布分别为

$$E_{-1}(x) = A_{-1} \exp[iK \sin(\theta_{-1})x], \quad (13)$$

$$E_1(x) = A_1 \exp[iK \sin(\theta_1)x], \quad (14)$$

其中 $K = 2\pi/\lambda$ 。 $+1$ 级和 -1 级衍射光传播到光纤纤芯位置的过程中仅产生相移。则两级衍射光在纤芯处的复振幅分布分别为

$$E'_{-1}(x) = A_{-1} \exp[iK \sin(\theta_{-1})x] \exp(iu), \quad (15)$$

$$E'_1(x) = A_1 \exp[iK \sin(\theta_1)x] \exp(iu), \quad (16)$$

其中 $\exp(iu)$ 表示传播过程中的相移, 两列波干涉叠加为

$$E(x) = E'_{-1}(x) + E'_1(x) = A_{-1} \exp[iK \sin(\theta_{-1})x] \exp(iu) + A_1 \exp[iK \sin(\theta_1)x] \exp(iu), \quad (17)$$

其中 $A_{-1} = A_1, \theta_1 = -\theta_{-1} = \theta$, 干涉场的强度分布为

$$I(x) = E(x)E(x)^* = 2A_1^2 [1 + \cos(2K \sin \theta x)], \quad (18)$$

由(18)式和(2)式可以得到干涉条纹的周期为

$$\Lambda = \frac{2\pi}{2K \sin \theta} = \frac{\Lambda_{\text{PM}}}{2}, \quad (19)$$

布拉格光栅的谐振波长为^[5]

$$m\lambda_0 = 2n_{\text{eff}}\Lambda, \quad (20)$$

其中 m 为刻写的光栅的阶次, n_{eff} 为光纤的有效折射率, 一般近似取 1.45, λ_0 为布拉格光栅的谐振波长。

图 3 是根据上面的分析数值模拟得到的光纤纤芯处 ± 1 级衍射光干涉条纹的归一化强度分布, 使用的相位掩模的周期为 $2.7 \mu\text{m}$ 。由图可知, 强度分布具有周期性, 周期为 $1.35 \mu\text{m}$, 干涉条纹的衬比度很高。将此周期值代入(20)式可以得到 2 阶布拉格光栅的谐振波长为 1957.5 nm 。

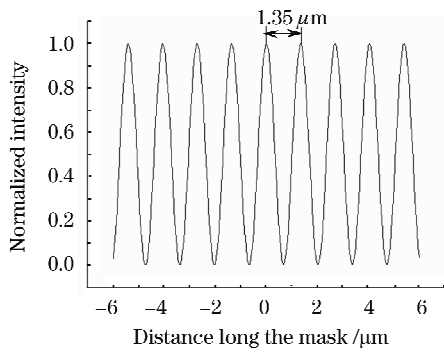
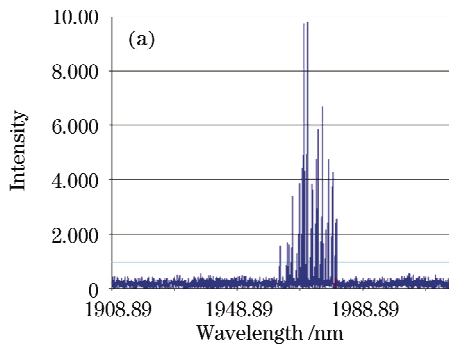


图 3 纤芯处干涉条纹强度归一化分布曲线
Fig. 3 Curve of normalize interference intensity in the core

3 实验结果与分析

在实验中,使用的刻写光源为相干公司的飞秒激光器,波长为 800 nm,脉冲宽度为 45 fs,重复频率为 1 kHz,脉冲能量为 500 μJ,柱透镜的焦距为 50 mm,聚焦后的光斑直径为 10 μm,光纤曝光几秒钟,并且通过波长计 EXFO WA-150 在线观测光纤所产生的激光谱。相位掩模的周期为 2.7 μm,采用的光纤为没有经过任何光敏处理的掺铒多模光纤,光纤的纤芯直径为 25 μm,数值孔径为 0.22,刻写时先除去光纤的聚合物保护层,光纤与相位掩模之间的距离为 2 mm。通过光学显微镜直接观察制作的布拉格光栅,如图 4(a)所示,制作的布拉格光栅



十分均匀,通过测量可以得到光栅的周期为 1.35 μm。图 4(b)是双光束干涉模型数值模拟的结果,条纹的周期也为 1.35 μm(为了观察方便对干涉条纹图像进行了放大)。通过比较可以看出模拟得到的结果与实验的结果十分吻合,从而证明这种模型的合理性。

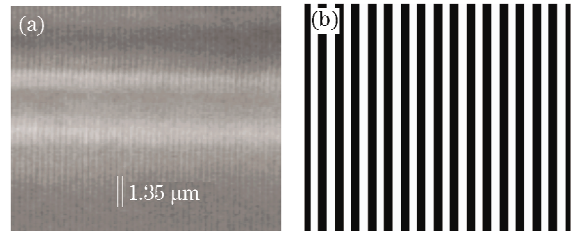


图 4 光栅图像。(a)刻写光栅的图像;(b)数值模拟光栅的图像

Fig. 4 Images of grating. (a) Depict the observed grating structure; (b) modeled two-beam interference patterns

为了测量所刻写布拉格光栅的谐振波长,将 793 nm 抽运光入射到刻有光栅光纤的另一端,通过波长计测量其激光谱,结果如图 5 所示,图 5(a)是没有刻写光栅时得到的激光谱,图 5(b)是刻写光栅以后得到的激光谱。通过比较可以明显地看出布拉格光栅得到了刻写,测量得到光栅的峰值谐振波长为 1960.9 nm,在误差允许的范围内,与理论计算的结果 1957.5 nm 吻合。

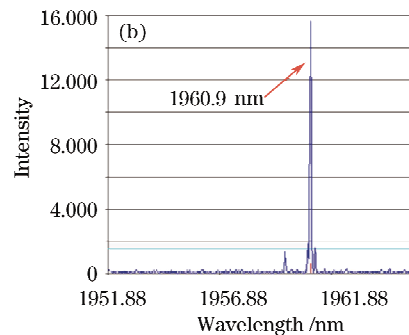


图 5 (a)未刻写光栅的激光谱;(b)刻写光栅后的激光谱
Fig. 5 (a)Spectrum without gratings; (b) spectrum with gratings

4 结 论

分析了飞秒激光的空间相干性和相位掩模的级次走离效应,运用双光束干涉原理对光纤纤芯处的干涉条纹进行了模拟。根据实验参数,模拟得到了干涉条纹图像,干涉条纹的周期为 1.35 μm,模拟得到的谐振波长为 1957.5 nm。实验表明,制作的布拉格光栅的图像、周期和谐振波长与理论计算的一

样,从而证明了该方法的合理性。

参 考 文 献

- 1 Guo Tuan, Zhao Qida, Liu Lihui *et al.*. Research on bandwidth-modulated and temperature-independent single fiber Bragg grating displacement sensing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27 (1): 15~20
- 2 郭 团, 赵启大, 刘丽辉 等. 带宽调制型单光纤光栅温变无补偿位移传感[J]. *光学学报*, 2007, 27(1): 15~20
- 2 Chen Xiaogang, Huang Dexiu, Yuan Xiuhua *et al.*. Wavelength

- division multiplexing/optical code division multiplexing system based on supercontinuum and superstructure fiber Bragg grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(1): 77~81
- 陈小刚, 黄德修, 元秀华等. 基于超连续谱和超结构光纤光栅的波分复用/光码分复用系统[J]. *中国激光*, 2008, **35**(1): 77~81
- 3 Li Shuo, Shou Guochu, Liu Yihong. Implementation of superstructure fiber Bragg gratings-orthogonal wavelength division multiplexing and analysis of receiver crosstalk [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(8): 1195~1200
- 李 硕, 寿国础, 胡怡红. 超结构光纤光栅的正交波分复用系统实现方案及接收机串扰分析[J]. *中国激光*, 2008, **35**(8): 1195~1200
- 4 S. J. Mihailov, C. W. Smelser, P. Lu *et al.*. Fiber Bragg gratings made with a phase mask and 800-nm femtosecond radiation[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(12): 995~997
- 5 S. J. Mihailov, C. W. Smelser, D. Grobncic *et al.*. Bragg gratings written in all-SiO₂ and Ge-doped core fibers with 800-nm femtosecond radiation and a phase mask [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2004, **22**(1): 94~100
- 6 C. W. Smelser, S. J. Mihailov, D. Grobncic. Formation of type I-IR and type II-IR gratings with an ultrafast IR laser and a phase mask[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(14): 5377~5386
- 7 D. Grobncic, S. J. Mihailov, C. W. Smelser. Femtosecond IR laser inscription of Bragg gratings in single- and multimode fluoride fibers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(24): 2686~2688
- 8 S. J. Mihailov, D. Grobncic. Efficient grating writing through fibre coating with femtosecond IR radiation and phase mask[J]. *Electr. Lett.*, 2007, **43**(8): 442~443
- 9 A. Dragomir, D. N. Nikogosyan, K. A. Zagorulko *et al.*. Inscription of fiber Bragg gratings by ultraviolet femtosecond radiation[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(22): 2171~2173
- 10 S. A. Slattery, D. N. Nikogosyan, G. Brambilla. Fiber Bragg gratings inscription by high-intensity femtosecond UV laser light; comparison with other existing methods of fabrication [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2005, **22**(2): 354~361
- 11 E. Wikszak, J. Thomas, J. Burghoff *et al.*. Erbium fiber laser based on intra-core femtosecond-written fiber Bragg grating[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(16): 2390~2392
- 12 P. E. Dyer, R. J. Farley, R. Giedl. Analysis of grating formation with excimer laser irradiated phase masks [J]. *Opt. Commun.*, 1995, **115**(3-4): 327~334
- 13 K. Kawamura, T. Ogawa, N. Sarukura *et al.*. Fabrication of surface relief gratings on transparent dielectric materials by two-beam holographic method using infrared femtosecond laser pulses [J]. *Appl. Phys. B: Lasers and Optics*, 2000, **71**(1): 119~121
- 14 C. W. Smelser, D. Grobncic, S. J. Mihailov. Generation of pure two beam interference grating structures in an optical fiber with a femtosecond IR source and a phase mask[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(15): 1730~1732
- 15 D. Grobncic, C. W. Smelser, S. J. Mihailov *et al.*. Fiber Bragg gratings with suppressed cladding modes made in SMF-28 with a femtosecond IR laser and a phase mask [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(8): 1864~1866
- 16 J. Thomas, E. Wikszak, T. Clausnitzer *et al.*. Inscription of fiber Bragg gratings with femtosecond pulses using a phase mask scanning technique[J]. *Appl. Phys. A*, 2007, **86**(2): 153~157