

飞秒激光对光纤布拉格光栅的曝光实验研究

张 玲¹ 苗 飞¹ 冯德军^{2*} 隋青美¹ 刘汉平³

¹ 山东大学控制科学与工程学院, 山东 济南 250061
² 山东大学信息科学与工程学院, 山东 济南 250100
³ 德州学院物理系, 山东 德州 253023

摘要 采用聚焦的红外飞秒激光对紫外激光刻写的 I 型光纤布拉格光栅 (FBG) 分别进行了单点和扫描式曝光实验, 重点研究了飞秒激光脉冲能量远低于光纤的损伤阈值情况下, 脉冲激光对光栅光谱的影响。实验发现, 激光单点照射栅区任意位置时, 照射过程中的光谱有较大红移, 且光谱结构不再是单透射峰而是不规则的多透射峰; 然而照射结束后的布拉格波长蓝移且光栅透射率增加, 随着曝光时间的增加该变化逐渐趋于饱和。通过建立非均匀温度场扩散模型, 激光诱导的折射率变化会叠加在原光栅的折射率调制分布上, 理论仿真了不同曝光时间后和曝光过程中的光谱变化, 与实验结果非常吻合。

关键词 超快光学; 飞秒激光; 非均匀温度场; 折射率调制; 光纤光栅

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0505006

Exposure Experiment Study of Fiber Bragg Grating by Femtosecond Laser

Zhang Ling¹ Miao Fei¹ Feng Dejun² Sui Qingmei¹ Liu Hanping³

¹ School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250061, China
² School of Information Science and Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250100, China
³ Department of Physics, Dezhou University, Dezhou, Shandong 253023, China

Abstract Single point and scan exposure experiments on ultraviolet laser inscribed type I fiber Bragg grating by focused infrared femtosecond laser are reported. The effect of femtosecond laser pulses on the grating transmission spectrum is studied especially when the pulse energy density is far lower than the fiber damage threshold. Experimental results show that the grating spectrum during irradiation shows a red shift, and the spectral structure is no longer a single transmission peak but more irregular transmission peaks. However, after stopping exposure, the resonant wavelength shows blue shift phenomenon and the transmissivity increases, which tend to be saturated with the time increasing. The grating exposure region is considered to be in a non-uniform temperature field, and the laser-induced refractive index change overlaps the original grating refractive index modulation distribution. The spectrum change during exposure and after a certain time's exposure is theoretically simulated and the simulation results fit well with the experimental ones.

Key words ultrafast optics; femtosecond laser; non-uniform temperature field; refractive index modulation; fiber grating

OCIS codes 320.2250; 350.3390; 140.6810; 060.3735

收稿日期: 2011-01-10; 收到修改稿日期: 2011-02-27

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2010FM001)和山东省高校科技发展计划(J10LA54)资助课题。

作者简介: 张 玲(1981—), 女, 博士研究生, 主要从事光纤传感技术及飞秒光刻等方面的研究。

E-mail: campuls@sina.com

导师简介: 隋青美(1963—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤传感技术及应用等方面的研究。

E-mail: qms@sdu.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: dejunfeng@sdu.edu.cn

1 引言

飞秒激光具有极高的峰值功率,经物镜聚焦在微小焦点区域的强度更高,自 1996 年 Davis 等^[1]使用聚焦的飞秒激光脉冲照射多种玻璃发现会引起玻璃的折射率永久性增加之后,飞秒激光已成为制作光纤光栅(FBG)等光波导器件的全新工具。近年来飞秒激光技术得到了快速发展^[2,3],国内外的多个研究小组已利用飞秒激光脉冲,分别采用逐点法、线扫描法、全息干涉法及借助相位掩模板法在多种光纤(如标准单模通信光纤、光敏光纤、光子晶体光纤等)内成功刻写了不同类型的光纤光栅^[4~15]。在运用飞秒激光制作包括光纤光栅在内的光波导器件过程中,根据激光重复频率和脉冲能量的不同,可以分为 3 种刻写条件^[16]:1)低重复频率(kHz)、高脉冲能量($\mu\text{J}\sim\text{mJ}$)的再生放大飞秒激光系统;2)高重复频率(MHz)、低脉冲能量(nJ)的飞秒激光振荡器;3)高重复频率(100 kHz~1 MHz)、高脉冲能量(nJ~ μJ)的掺镱光纤激光器及快速激光振荡器等。

运用飞秒激光刻写的光波导器件的特性与被照射样品材料、聚焦条件、入射激光参数、曝光时间等密切相关,人们也提出了不同的模型^[17~23]来解释飞秒激光诱导折射率变化的机理。当前的研究表明^[24],当脉冲能量低于材料的损伤阈值时,采用飞秒激光诱导的波导结构一般是 Type I 波导,一般认为色心形成、结构改变及热熔融是折射率改变的主要原因;当脉冲能量高于材料的损伤阈值时,形成的波导结构称为 Type II 波导,一般认为材料损伤引入的应力场是折射率局部增加的主要原因。目前,人们对飞秒激光刻写光波导的研究方兴未艾,对其诱导折射率改变机理的解释还不是很完善,而在实际刻写过程中,因为被照射介质、聚焦条件和方式、激光器参数、曝光时间等因素不可能完全一致,折射率改变可能是以上一种或几种机理共同作用的结果。为了更好地理解在飞秒激光照射下介质折射

率改变的本质,还需要探索介质在飞秒激光脉冲作用下的光感生折射率变化的规律和机理,这对于建立所刻光波导特性与引起折射率变化的照射条件之间的合适物理模型、批量制作高性能光波导器件有重要意义。

为研究激光脉冲的能量密度低于光纤损伤阈值时飞秒激光与光纤介质的相互作用,本文实验研究了高重复频率(76 MHz)的红外(800 nm)聚焦飞秒激光脉冲对紫外激光(氩离子倍频激光器,244 nm)刻写的 I 型光纤布拉格光栅的曝光作用。激光脉冲能量远低于光纤的能量阈值,但是聚焦光斑的高斯能量分布导致被照射光纤光栅的曝光区处在一个非均匀温度场中。把聚焦的激光脉冲看作一系列热源,分析了热源温度扩散过程对光栅折射率的影响,给出了激光脉冲单点照射光栅过程中的温度分布模型及照射结束后折射率的调制轮廓模型。仿真结果证明了在低能量情况下焦点的热场是引起光栅折射率改变的主要因素,模型仿真结果与实验现象能很好地符合。

2 实验方案及结果

实验装置如图 1(a)所示。将光纤光栅(栅区长度为 5.6 mm,波长为 1557.544 nm,强度为 15 dB)固定在一维移动平台(卓立汉光 KSA111-400-S5N)上,该平台的运动方向、速度等可通过控制器和计算机来设定以实现单点曝光或者扫描曝光;光纤光栅的一端接宽带光源[课题组自制掺铒光纤放大器(EDFA)光源,波长范围:1528~1565 nm],另一端接光谱分析仪(Ando AQ6331,分辨率 0.05 nm)以实时得到实验结果。飞秒激光由钛蓝宝石锁模超快振荡器(Coherent 公司的 Mira Optima 900-F)产生,激光的重复频率 $f=76\text{ MHz}$,平均功率 $P_A=650\text{ mW}$,脉冲持续时间 $\tau=130\text{ fs}$,束腰半径($1/e^2$ 处) $w\approx 1.5\text{ mm}$ 。用一个焦距为 250 mm 的双凸透

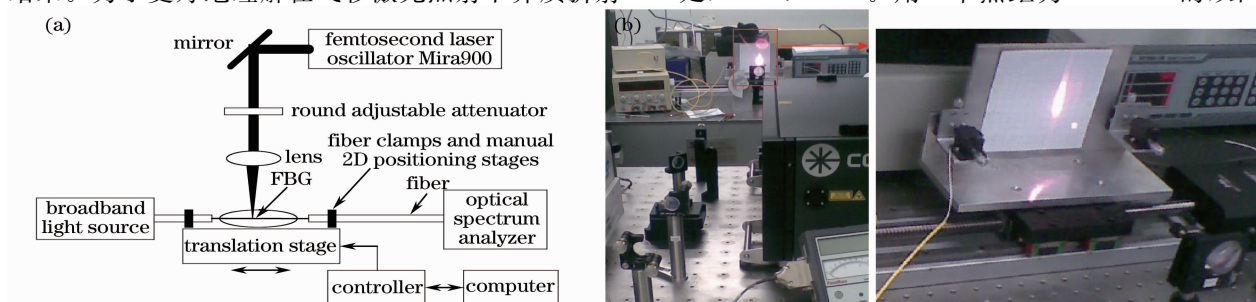


图 1 (a) 实验装置图, (b) 实验装置照片

Fig. 1 (a) Schematic of laser exposure, (b) photos of laser exposure experimental setup

镜聚焦激光于纤芯,曝光能量可通过圆形可调衰减器加以改变。图1(b)是实验装置照片。

首先将聚焦的飞秒激光脉冲对栅区的中心位置进行照射,曝光一定时间之后遮挡激光。图2是对栅区中心位置分别曝光了2,14,20和620 s后的光谱。可见,随着曝光时间的延长,布拉格波长发生蓝移且光栅透射率增加。大约在14 s之后光谱就没有了显著变化,可理解为激光诱导的折射率变化趋于饱和。经多次实验验证和长时间观察,对光谱造成的变化影响是永久性的。

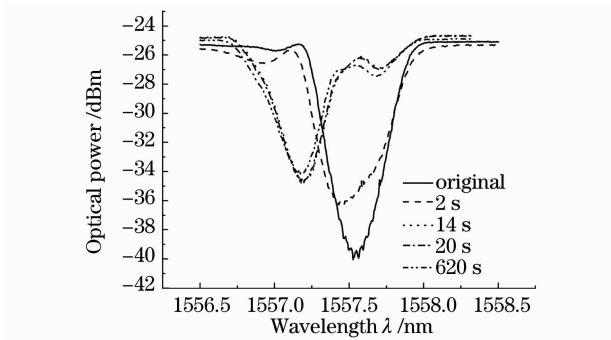


图2 光栅中心位置曝光不同时间后的光谱
Fig. 2 Transmission spectra after grating center undergoing different exposure time

有趣的是,观察到照射过程中的光谱向长波方向有较大移动,且光谱结构不再是单透射峰而是不规则的多透射峰。图3记录了其中的一个光谱。在单点曝光栅区其他位置的过程中亦发现类似现象。

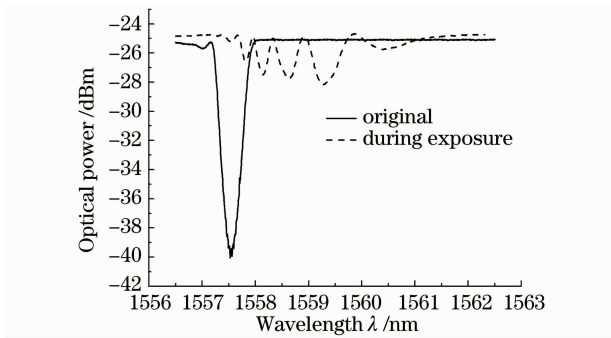


图3 光栅在单点曝光过程中的光谱与初始光谱对比
Fig. 3 Spectrum during exposure compared with the original one

令平台带动光纤以0.25 mm/s做往返移动对整个栅区进行了扫描式曝光,图4表示激光从光栅的A端扫描至B端过程中,在6个不同位置观察到的透射光谱。随着扫描从A端开始,FBG的透射率逐渐增加;当扫描经过光栅中点之后,透射率又逐渐降低;当扫描到结束端B时,透射峰和起始端的透射峰相同。

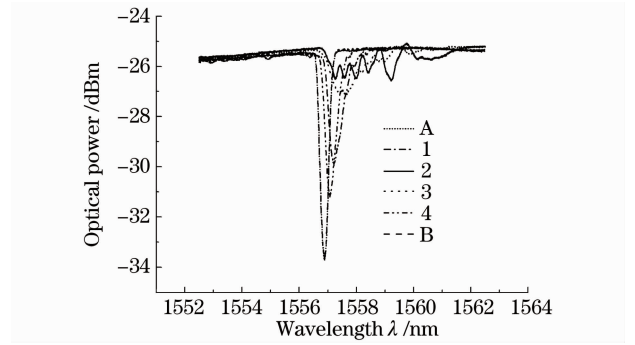


图4 扫描式曝光栅区的光谱变化
Fig. 4 Spectra change when exposure from end A to end B

3 理论及实验结果分析

由于飞秒激光的光子密度超出其他激光光源,原先在透明介质中难以获得的多光子吸收变得十分容易。当高强度($10^{11} \sim 10^{13} \text{ W/cm}^2$)的飞秒紫外、近紫外或红外激光照射光纤时,多光子吸收作用激发的能量能达到8~12 eV,超出了锗硅光纤的带隙能(大于7.1 eV,小于9.3 eV),大量的价带电子从导带跃迁到价带,当其密度超过等离子体密度时,材料开始大量吸收激光能量,能量的沉积使介质材料局域收缩或形成缺陷造成致密化而引起损伤,最终导致介质折射率的改变。

实验中聚焦光斑的半径 $w_0 \approx 42.4 \mu\text{m}$,远大于光纤的纤芯直径(约 $9 \mu\text{m}$),聚焦光斑太大,能量分散。另外,激光脉冲在聚焦前平均功率约500 mW,根据激光的峰值能量密度公式,可求得实验采用的激光强度约为 $9 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$,远低于光纤的损伤阈值。此处,聚焦光斑的能量分布可近似为一个球形高斯函数^[23]

$$E(r) = A_{\text{non}} E_{\text{in}} \exp\left[-2\left(\frac{r}{w_0}\right)^2\right], \quad (1)$$

式中 r 为径向距离; E_{in} 为入射激光的单脉冲能量; A_{non} 为介质对飞秒激光的非线性吸收系数,与入射激光的脉冲能量有关,这里取0.3。因为光纤直径 $125 \mu\text{m}$ 远小于光栅长度5.6 mm,所以只需考虑热量沿光纤径向的传递而忽略其沿轴向的扩散,表示为^[25]

$$\frac{\partial T(r,t)}{\partial t} - \frac{k}{\rho c} \frac{\partial^2 T(r,t)}{\partial r^2} = \frac{k_r A \Delta T(r)}{\rho c V}, \quad (2)$$

$$\Delta T(r) = \frac{E(r)}{\rho c V}, \quad (3)$$

式中 $T(r,t)$ 为温度; t 为时间; k 为光纤的热传导率,取 $0.3 \text{ W/(km} \cdot \text{C)}$; ρ 为光纤的密度,取 1.38 g/cm^3 ; c 为

光纤的比热,取 $1.5 \text{ J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; k_r 为光纤的传热系数,取 $20 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$; $A = 4 \cdot \omega \cdot \omega_0$ 是聚焦面积; V 是受热部分的体积,这里取聚焦光斑大小与光纤直径构成的区域。假设光纤包层与空气分界面为热扩散边界,令其温度恒定,取室温值 $20 \text{ }^\circ\text{C}$,假设聚焦光斑横截面中心处的温度为 $100 \text{ }^\circ\text{C}$,则单个激光脉冲在光纤内的热源扩散 Matlab 仿真如图 5 所示,扩散时间到 20 ms 时的温度分布如图 6 所示,可见热源扩散很快。实验所用激光的相邻两脉冲的时间间隔约为 13 ns ,远远低于于热扩散的特征时间,所以在激光照射过程中,在聚焦区域会有热能量的积累,导致每次脉冲入射时引起的瞬时温升 ΔT 都会累加到脉冲入射前的温度上,然后温度将会依据(2)式重

新分布。所以,光栅的曝光区域可视为非均匀的温度场。

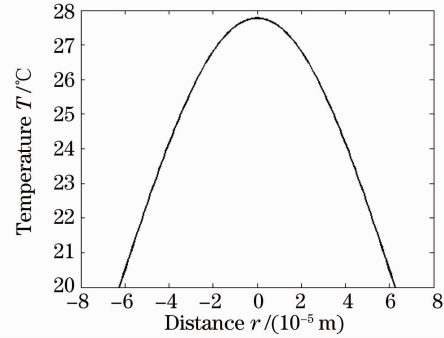


图 6 $t = 20 \text{ ms}$ 时的温度分布

Fig. 6 Temperature distribution $t = 20 \text{ ms}$

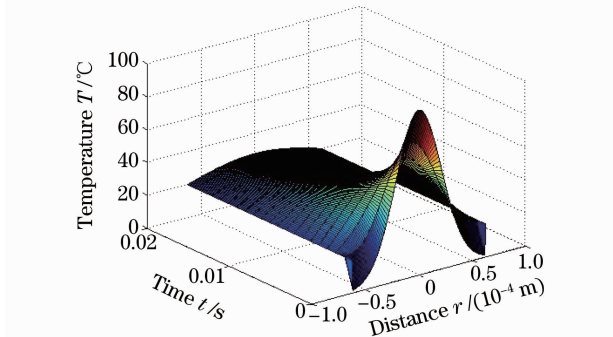


图 5 单个激光脉冲的热源扩散

Fig. 5 Heat diffusion of single laser pulse

研究发现^[21],采用 800 nm 飞秒激光脉冲逐点法刻写的光纤光栅,其折射率轮廓在聚焦中心区域由于微孔的形成导致折射率负增长,而在聚焦中心外侧的环带部分由于结构致密化导致折射率增加。实验采用的激光脉冲能量较低,假设激光诱导的折射率变化如图 7(a)所示,其中 Δn_1 表示聚焦中心外侧环带的折射率改变量,取作 $\Delta n_1 = 1.5 \times 10^{-4}$; Δn_2 表示聚焦中心的折射率改变量,取作 $\Delta n_2 = -5 \times 10^{-4}$ 。激光诱导的折射率变化重叠在被照射光栅原折射率调制轮廓上,纤芯有效折射率调制的交流分量和直流分量均相应降低,则栅区经单点曝光后的纤芯折射率调制分布如图 7(b)所示。

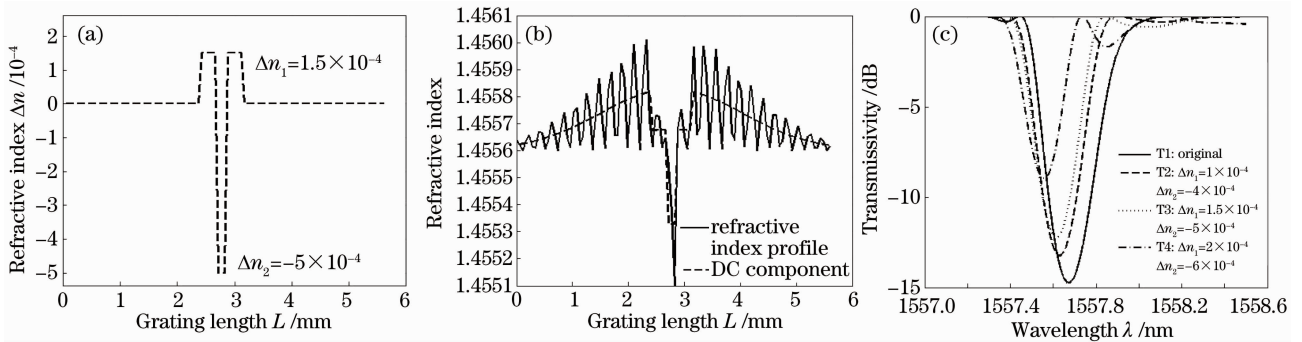


图 7 (a) 飞秒激光诱导的折射率变化,(b)单点曝光栅区中心后的光栅折射率调制分布,(c)不同曝光时间后的透射光谱变化

Fig. 7 (a) Refractive index profile induced by femtosecond laser, (b) grating refractive index profile after single spot exposure, (c) transmission spectra after different exposure time

随着曝光时间的延长,激光诱导的折射率调制幅度和折射率改变区域均逐渐增大。根据图 7(b)所示的折射率调制分布模型和传输矩阵法仿真了光栅的光谱,如图 7(c)所示。曲线 T1 是光纤光栅的初始光谱,曲线 T2, T3 和 T4 均是叠加了不同激光诱导折射率变化之后的光栅光谱,且它们对应的激光诱导的折射率变化(Δn_1 和 Δn_2)的绝对值逐渐增

加。曲线 T2 和 T3 中激光诱导的折射率变化发生在较小的区域: Δn_1 作用在栅区 $2.5 \sim 2.7 \text{ mm}$ 及 $2.9 \sim 3.1 \text{ mm}$ 处, Δn_2 作用在栅区 $2.7 \sim 2.9 \text{ mm}$ 处;而曲线 T4 中激光诱导的折射率变化发生在较大区域: Δn_1 作用在栅区 $2.24 \sim 2.63 \text{ mm}$ 及 $3.00 \sim 3.36 \text{ mm}$, Δn_2 作用在栅区 $2.69 \sim 2.91 \text{ mm}$ 处。可见,随着扫描时间增加造成温度的累积,光栅的透射

峰逐渐蓝移,透射率逐渐增加。该仿真结果与实验结果图2一致。仿真参数取值如下:光纤有效折射率1.4556,光栅长度5.6 mm,周期0.535 μm ,折射率调制深度 2.28×10^{-4} ,光栅分段数100。

假设非均匀温度场 $[T(L), L$ 是光栅长度]呈阶梯对称分布,如图8(a)所示,这里假设室温是20 $^{\circ}\text{C}$,因为在曝光过程中,热能量的累积引起瞬时温升,所以激光热源引起的中心最高温度取值250 $^{\circ}\text{C}$,高于上面单脉冲激光热源的假设值100 $^{\circ}\text{C}$ 。因热光效应和热膨胀效应引起光栅波长的红移为

$$\Delta\lambda_B = (\zeta + \alpha)\lambda_B \Delta T, \quad (4)$$

式中 $\zeta = (1/n_{\text{eff}}) \cdot (\partial n_{\text{eff}}/\partial T)$ 为光纤的热光系数,

取值 $8.6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$; $\alpha = (1/\Lambda)(\partial \Lambda/\partial T)$ 为光纤的热膨胀系数,取值 $0.55 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,其中 Λ 为光栅周期。仿真结果如图8(b)所示,与实验结果图3一致,其余仿真参数取值同上。

对于扫描式曝光引起的光谱变化,可以认为呈阶梯对称分布的非均匀温度场 $T(L)$ 相对于光纤的移动而作用在栅区不同位置,所以仿真时应采用较小的温度梯度(最高温度取170 $^{\circ}\text{C}$)。仿真发现, $T(L)$ 在栅区的位置关于栅区中心对称时,它们的光栅透射光谱也完全相同,仿真结果如图9所示,该结果与图4的实验现象吻合。

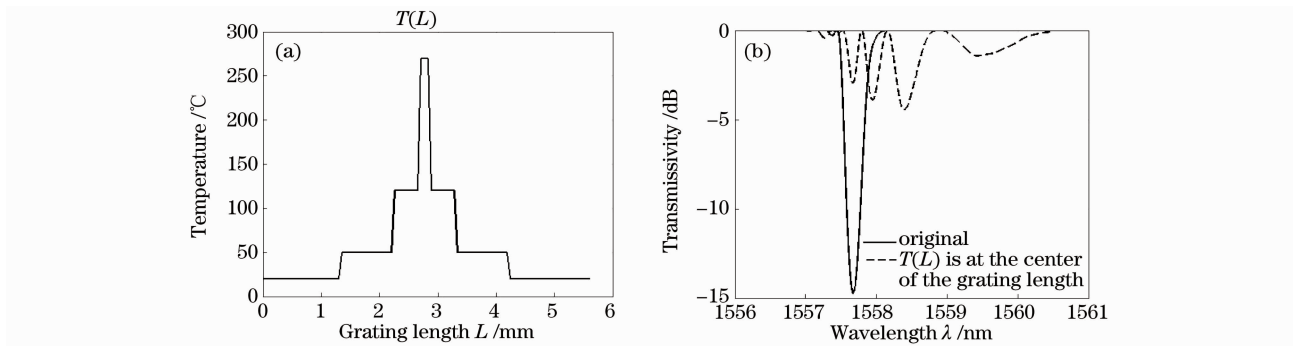


图8 (a)激光引起的非均匀温度场模型,(b)光栅在(a)温度下的光谱与初始光谱对比

Fig. 8 (a) Non-uniform temperature field, (b) spectrum for temperature in (a) compared with original spectrum

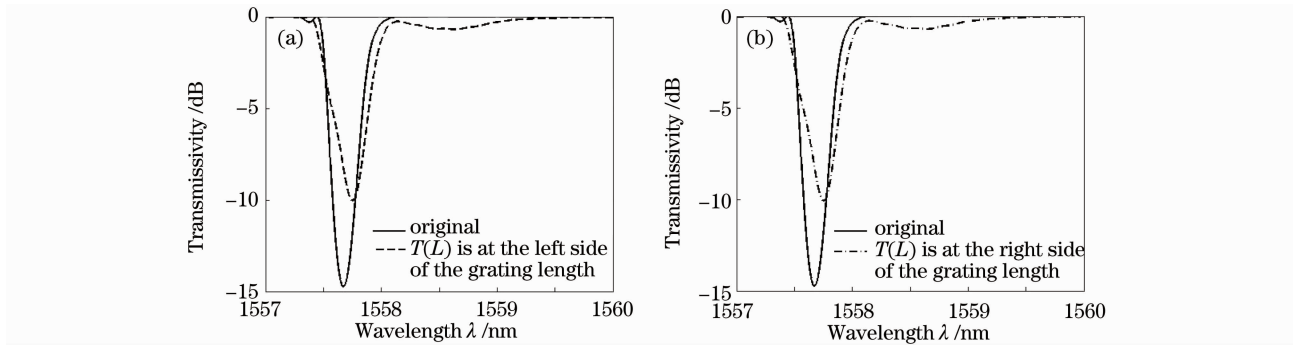


图9 温度场 $T(L)$ 作用在(a)左侧及(b)右侧栅区时的光谱与光栅初始光谱对比

Fig. 9 Original spectrum compared with spectrum when the temperature field $T(L)$ is at (a) the left side and (b) the right side of the grating length

4 结 论

采用聚焦的飞秒激光对紫外激光刻写的I型光纤布拉格光栅分别进行了单点和扫描式曝光实验,重点研究了飞秒激光脉冲能量远低于光纤的损伤阈值情况下,飞秒激光脉冲对光栅光谱的影响。研究表明,聚焦光斑引起的非均匀温度分布是引起光栅纤芯折射率改变的主要因素,激光诱导的折射率变化叠加在被照射光栅原折射率调制分布轮廓上,实

验和仿真结果一致表明,随着曝光时间增加造成温度的累积,光栅透射峰波长逐渐蓝移,透射率逐渐增加。同时,通过建立单点曝光和扫描式曝光过程的非均匀温度场模型,理论研究了曝光过程中的光谱变化,仿真结果亦与实验现象很好地吻合。这一研究结论对飞秒激光诱导折射率改变的机理研究有重要参考价值。

参 考 文 献

- 1 K. M. Davis, K. Miura, N. Sugimoto *et al.*. Writing waveguides in glass with a femtosecond laser[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(21): 1729~1731
- 2 Liu Bowen, Hu Minglie, Song Youjian *et al.*. Photonic crystal fiber femtosecond laser amplifier with millijoules and 100 fs level output[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(9): 2415~2418
刘博文, 胡明列, 宋有建等. 微焦耳、百飞秒光子晶体光纤飞秒激光放大器[J]. *中国激光*, 2010, **37**(9): 2415~2418
- 3 Fang Xiaohui, Hu Minglie, Liu Bowen *et al.*. Hundreds of megawatts peak power multi-core photonic crystal fiber laser amplifier[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(9): 2366~2370
方晓惠, 胡明列, 刘博文等. 百兆瓦峰值功率的多芯光子晶体光纤飞秒激光放大系统[J]. *中国激光*, 2010, **37**(9): 2366~2370
- 4 Yuki Kondo, Kentaro Nouchi, Tsuneo Mitsuyu *et al.*. Fabrication of long-period fiber gratings by focused irradiation of infrared femtosecond laser pulses[J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(10): 646~648
- 5 A. I. Kalachev, V. Pureur, D. N. Nikogosyan. Investigation of long-period fiber gratings induced by high-intensity femtosecond UV laser pulses[J]. *Opt. Commun.*, 2005, **246**(1-3): 107~115
- 6 Zhang Nan, Yang Jianjun, Wang Mingwei *et al.*. Fabrication of long-period fiber gratings using 800 nm femtosecond laser pulses [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2006, **23**(12): 3281~3284
- 7 Shujing Liu, Wei Jin, Long Jin *et al.*. Fabrication of long-period fiber gratings by using of a femtosecond laser source [C]. Optoelectronics and Communications Conference, 2009, Hongkong WQ6.1~2
- 8 Haifeng Xuan, Wei Jin, Shujing Liu. Long-period gratings in wavelength-scale microfibers [J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(1): 85~87
- 9 Changrui Liao, Ying Wang, D. N. Wang *et al.*. Femtosecond laser inscribed long-period gratings in all-solid photonic bandgap fibers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2010, **22**(6): 425~427
- 10 Kaiming Zhou, Mykhaylo Dubov, Chengbo Mou *et al.*. Line-by-line fiber Bragg grating made by femtosecond laser [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2010, **22**(16): 1190~1192
- 11 Yiping Wang, Hartmut Bartelt, Martin Becker *et al.*. Fiber Bragg grating inscription in pure-silica and Ge-doped photonic crystal fibers [J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(11): 1963~1968
- 12 Rui Suo, Joris Lousteau, Hongxia Li *et al.*. Fiber Bragg gratings inscribed using 800 nm femtosecond laser and a phase mask in single- and multi-core mid-IR glass fibers [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(9): 7540~7548
- 13 Y. Lai, K. Zhou, K. Sugden *et al.*. Point-by-point inscription of first-order fiber Bragg grating for C-band applications [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(26): 18318~18325
- 14 Jens Thomas, Christian Voigtländer, Damian Schimpf *et al.*. Continuously chirped fiber Bragg gratings by femtosecond laser structuring [J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(14): 1560~1562
- 15 Wang Yuezhu, Wang Wei, Zhang Yunjun *et al.*. Theory analysis of fiber grating production using infrared femtosecond [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 2978~2982
王月珠, 王巍, 张云军等. 近红外飞秒脉冲激光制作光纤光栅的研究 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(11): 2978~2982
- 16 Martin Ams, Graham D. Marshall, Peter Dekker *et al.*. Withford investigation of ultrafast laser-photonic material interactions: challenges for directly written glass photonics [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2008, **14**(5): 1370~1381
- 17 P. Dekker, M. Ams, G. D. Marshall *et al.*. Annealing dynamics of waveguide Bragg gratings: evidence of femtosecond laser induced colour centres [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(4): 3274~3283
- 18 Alexander M. Streltsov, Nicholas F. Borrelli. Study of femtosecond-laser-written waveguides [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2002, **19**(10): 2496~2504
- 19 Christopher Miese, Michael J. Withford, Alexander Fuerbach. Ultrafast direct written waveguide Bragg gratings utilizing a high pulse energy femtosecond oscillator [C]. ICTON 2010, Munich, Germany, Th. B4.6.1~4
- 20 Li Ming. Theoretical and Technical Research on Fabricating Micro Fiber F-P (Fabry-Perot) Sensor with Femtosecond Laser Pulses [D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2008. 22~35
李明. 飞秒激光制造微型FP光纤传感器机理与技术研究 [D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2008. 22~35
- 21 Amos Martinez, Michael Dubov, Igor Khrushchev *et al.*. Photoinduced modifications in fiber gratings inscribed directly by infrared femtosecond irradiation [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(21): 2266~2268
- 22 C. B. Schaffer, J. F. Garcia, E. Mazur. Bulk heating of transparent materials using a high-repetition-rate femtosecond laser [J]. *Appl. Phys. A*, 2003, **76**: 351~354
- 23 Shane M. Eaton, Haibin Zhang, Peter R. Herman. Heat accumulation effects in femtosecond laser-written waveguides with variable repetition rate [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(12): 4708~4716
- 24 A. Fuerbach, S. Gross, C. Miese *et al.*. Direct writing of photonic devices using femtosecond laser pulses [C]. ICTON 2010, Munich, Germany, Th. A4.2.1~4
- 25 Chen Chao. Research of Fabrication of Fiber Bragg Grating by Femtosecond Laser and Its Application [D]. Changchun: Jilin University, 2010. 53~54
陈超. Bragg光纤光栅飞秒激光微纳制备及其应用的研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2010. 53~54