

文章编号: 0258-7025(2004)Supplement-0164-02

飞秒激光制备折射率调制光栅及分析

郭亨长, 王曦, 方瀛, 彭超, 杨宏, 蒋红兵*, 龚旗煌

(北京大学物理学院现代光学研究所, 人工微细结构和介观物理国家重点实验室, 北京 100871)

摘要 利用飞秒激光(120 fs, 810 nm, 1 kHz)线扫描方法在石英玻璃体内形成折射率调制型光栅结构。研究光栅结构折射率调制度 Δn 与飞秒激光脉冲能量、扫描速度和扫描重复率等参量的关系。多次扫描的光栅结构 Δn 提高到 3×10^{-3} 。说明积累效应对折射率调制结构的形成起重要作用, 并解释以往得到 Δn 大小不同的原因。

关键词 应用光学; 折射率调制光栅; 飞秒激光微制备; 石英玻璃

中图分类号 O437

文献标识码 A

Fabrication of Refractive Index-Modulated Grating in Fused Silica by a Femtosecond Laser

GUO Heng-chang, WANG Xi, FANG Ying, PENG Chao, YANG Hong, JIANG Hong-bing*, GONG Qi-huang

(State Key Laboratory for Mesoscopic Physics and Department of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract The refractive index-modulated grating, performed by line scan in fused silica with a femtosecond laser at wavelength of 810 nm and repetition rate of 1 kHz, were presented. Dependence of the refractive index-modulation on femtosecond laser pulse energy, scan speed, spacing period, and scanning repetitions was investigated. The refractive index modulation reached to 3×10^{-3} after several scanning repetitions. It was revealed that the accumulation effect played a very important role in the formation of refractive index-modulated structures.

Key words applied optics; index-modulated grating; femtosecond laser microfabrication; fused silica

1 引言

超短激光脉冲在透明电介质材料体内通过多光子吸收等非线性光学过程, 可以引起折射率变化并用来实现三维微制备^[1,2]。自1996年日本京都大学利用近红外飞秒激光在玻璃体内形成折射率调制的光波导^[3]以来, 飞秒激光微制备工作得到了广泛关注。在光信息处理和集成光学器件方面已经开展了一系列应用研究, 如: 光波导^[3-6]、耦合器^[7-9]、光栅^[10]和微透镜^[11]等方面。然而, 以往报道折射率调制度(Δn)范围从 10^{-5} 到 10^{-2} 变化, 存在极大的差别^[2-11]。本文利用显微物镜(4 \times , NA=0.1)聚焦飞秒激光在石英体内制备光栅结构, 研究飞秒激光脉冲能量、扫描速度和重复扫描次数等制备参量对 Δn 的影响。采用积累效应解释以往得到 Δn 大小不同的原因。为飞秒激光在透明电介质材料体内微制备的过程中更好地控制微结构的形成提供依据。

2 光栅结构的制备及 Δn 的测量

实验系统采用飞秒激光器, 波长 810 nm, 重复率 1 kHz, 脉宽 120 fs。激光束经空间滤波后由显微物镜(4 \times , NA=0.10)聚焦到石英玻璃(10 mm \times 5 mm \times 3 mm)体内, 并产生成丝形微结构。飞秒激光沿 Z 轴方向传输, 光栅结构通过控制三维平移台的运动参量进行扫描。

光栅结构如图 1 所示, 其周期为 5.3 μm , 光栅厚度 50 μm 。实验中扫描速度为 10 $\mu\text{m}/\text{s}$, 脉冲能量 1.2 μJ , 每条线型结构均由 X 方向扫描形成。利用三维平移台让样品垂直于激光束移动, 激光束自陷传播在样品内产生的折射率变化长丝在样品内来回移动, 从而形成线状的折射率调制结构。由于成丝长度较长, 在 XY 截面和 YZ 截面都可以用于衍射。

为测量光栅结构的 Δn , 实验中采用 He-Ne 激光入射到光栅的 YZ 面, 再利用公式(1)进行推算得

基金项目: 自然科学基金项目资助(10104003, 90101027, 50173031)

作者简介: 郭亨长(1977-), 男, 北京大学物理学院博士生, 主要从事飞秒激光与透明电介质相互作用及微结构制备方面的研究。E-mail: hcguo@water.pku.edu.cn. * 通信联系人, E-mail: hbjiang@pku.edu.cn

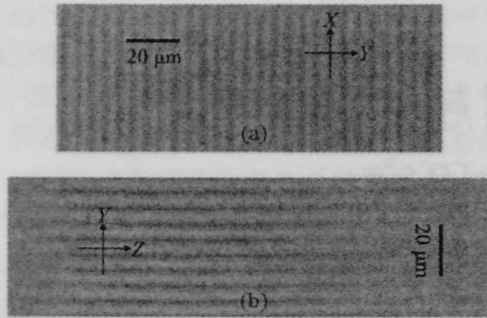


图1 石英体内光栅结构和衍射图形,空间周期 $5.3\mu\text{m}$

(a) XY截面的光栅图像; (b) YZ截面的成丝图像

Fig.1 Optical image of the fabricated grating observed by a microscope. Spacing period of the grating is $5.3\mu\text{m}$
(a) XY section plane of the grating (b) YZ section plane of the grating
到 $\Delta n^{[12]}$ 。

$$\Delta n = \frac{\lambda}{\pi d} \cos\theta_1 \arcsin \sqrt{\eta} \quad (1)$$

其中, λ 为 He-Ne 激光波长 (632.8 nm), d 为光栅厚度 ($50\mu\text{m}$), η 为 1 级 Bragg 衍射效率, θ_1 为相应入射角。实验对 Δn 和周期关系进行描述。测得当周期在 $5.2\sim 5.5\mu\text{m}$ 范围时, Δn 比较大。以下实验分析所制备光栅的周期均在此范围内。

3 积累效应对 Δn 的影响

3.1 激光脉冲能量等参量对成丝长度的影响

采用低数值孔径的透镜聚焦制备光栅结构,往往需要控制成丝长度。如图 2 所示,脉冲能量在 $3.5\mu\text{J}$ 以下,聚焦飞秒激光在石英玻璃体内的成丝长度随脉冲能量增加呈线性上升。而脉冲能量不变,改变扫描速度时,成丝长度随速度增加呈线性递减。成丝长度的变化认为是积累效应在起作用。

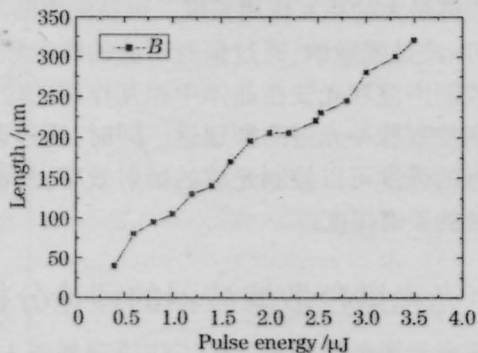


图2 扫描速度 $10\mu\text{m/s}$ 时成丝长度和脉冲能量的关系

Fig.2 Dependence of the filament on pulse energy with fixed scan velocity of $10\mu\text{m/s}$

3.2 脉冲能量、扫描速度和扫描重复率对 Δn 的影响

实验研究发现在破坏阈值以下, Δn 随脉冲能量增加而增加。在同样的脉冲能量, Δn 随扫描速度的提高呈线性递减关系。

单次扫描时,得到的 Δn 往往比较低。当扫描速度为 $10\mu\text{m/s}$, 脉冲能量为 $1.2\mu\text{J}$ 时, 单次扫描得到光栅 Δn 约 2.3×10^{-4} 。重复扫描 20 次, Δn 可提高到 3×10^{-3} 。当扫描次数继续增加时, Δn 也随之增加并趋于饱和。因为飞秒激光聚焦到石英体内, 导致晶格温度升高, 而低重复率的飞秒激光器使得积累有限而趋于平衡值。所以制备折射率调制结构时, 多次重复扫描可以大幅度地提高 Δn 。扫描速度不同, 控制扫描重复率, 发现在曝光能量相同时低速扫描 Δn 比较高。我们认为积累效应对制备结构的 Δn 形成起作用, 并解释以往所报道 Δn 结果不同的原因。

参考文献

- 1 A. M. Streltsov, N. F. Borrelli. Study of femtosecond-laser-written waveguides in glasses [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2002, **19**: 2496-2504
- 2 K. Yamada, W. Watanabe, T. Toma. In situ observation of photoinduced refractive-index changes in filaments formed in glasses by femtosecond laser pulses [J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**: 19-21
- 3 K. M. Davis, K. Miura, N. Sugimoto. Writing waveguides in glass with a femtosecond laser [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**: 1729-1731
- 4 M. Will, S. Nolte, B. N. Chichkov. Optical properties of waveguides fabricated in fused silica by femtosecond laser pulses [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**: 4360-4364
- 5 A. Salimnia, N. T. Nguyen, M. -C. Nadeau. Writing optical waveguides in fused silica using 1 kHz femtosecond infrared pulses [J]. *J. Appl. Phys.*, 2003, **93**: 3724-3728
- 6 J. W. Cha, T. Huser, S. Risbud. Structural changes in fused silica after exposure to focused femtosecond laser pulses [J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**: 1726-1728
- 7 D. Homoelle, S. Wielandy, A. L. Gaeta. Infrared photosensitivity in silica glasses exposed to femtosecond laser pulses [J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**: 1311-1313
- 8 A. M. Streltsov, N. F. Borrelli. Fabrication and analysis of a directional coupler written in glass by nanojoule femtosecond laser pulses [J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**: 42-43
- 9 J. W. Chan, T. R. Huser, S. H. Risbud. Waveguide fabrication in fused silica using tightly focused femtosecond laser pulses [C]. *SPIE*, 2002, **4640**: 129-136
- 10 L. Sudrie, M. Franco, B. Prade. Writing of permanent birefringent microlayers in bulk fused silica with femtosecond laser pulses [J]. *Opt. Commun.*, 1999, **171**: 279-284
- 11 E. Bricchi, J. D. Mills, P. G. Kazansky. Birefringent Fresnel zone plates in silica fabricated by femtosecond laser machining [J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**: 2200-2202
- 12 H. Kogelnik. Coupled wave theory for thick hologram gratings [J]. *The Bell System Technical Journal*, 1969, **48**: 2909-2947