

用飞秒激光在透明介质体内形成衍射光栅*

刘青^{1,2} 程光华¹ 王屹山¹ 程昭¹ 马琳³ 赵卫¹ 陈国夫¹

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学技术国家重点实验室, 西安 710068)

(2 宁夏大学物理与电气信息工程学院, 银川 750021)

(3 西安电子科技大学技术物理学院, 西安 710071)

摘要 用数值孔径为0.65的40倍显微透镜紧聚焦能量稍高于能量损伤阈值的200 fs的钛宝石激光脉冲, 分别在ZK6玻璃和K9玻璃内部导致局部折射率改变, 在透明介质内部形成透射式相位衍射光栅. 在635 nm的He-Ne激光照射下, 通过对光栅衍射效率的数值拟合计算, 得出了光栅条纹宽度与实际测量基本吻合, 这从侧面证明了折射率改变区域为超高斯型的假定. 还对折射率改变区域的性质进行了分析. 在实验上观察到脉冲间的相互影响将导致折射率改变区域范围的增大. 从理论上给出了增加1级衍射效率的途径.

关键词 飞秒脉冲; 光栅; 衍射效率; 透明介质

中图分类号 TN249 **文献标识码** A

0 引言

随着超短脉冲激光技术的不断发展, 激光的功率不断提高, 为超强、超快激光与物质相互作用提供了广阔的应用领域. 近几年, 有关飞秒脉冲激光与透明物质相互作用的研究受到了广泛的关注, 高强度飞秒激光与透明物质的非线性相互作用, 将导致透明物质的物理、化学性质(如: 晶体结构、折射率、结合键等)发生改变, 形成精确的光学性质改变区域^[1]. 利用飞秒脉冲激光与透明物质的这种非线性相互作用, 可以在透明介质中制作多种紧凑的光学元件, 如光波导^[1-4]和光栅^[3,5-8], 这方面的研究将为这些光学器件的制造和飞秒激光与透明物质的相互作用研究提供帮助.

多年以来, 人们一直在利用各种方法研究和提高光栅的各种性能. 由于飞秒脉冲激光对物质进行处理的过程具有热作用区域小、加工精度高等优点, 因此成为制作高性能光栅的新工具. K. Hirao和K. Miura^[3]在几种玻璃介质中用飞秒激光写入了光波导结构, 发现产生折射率改变的硅玻璃表面出现了收缩现象. L. Sudrie等人^[5]用飞秒激光在熔融石英体中制作了透射式相位光栅, 并发现经飞秒激光的照射, 熔融石英体内局部发生了折射率的改变, 并表现出双折射的性质. S. H. Cho等人^[6]利用波长为790 nm、脉冲宽度为150 fs的飞秒激光在平面硅片内部产生了衍射光栅结构, 发现在折射率发生改变的同时总是伴随有低密度等离子体结构的出现. 本文中, 用40倍、0.65-NA的物镜将200 fs、800 nm、1 kHz的近红外飞秒脉冲激光紧聚焦到玻璃

(K9), 和ZK6玻璃体内, 在介质体内形成周期性的折射率改变的永久性衍射光栅结构, 用超高斯型折射率改变模型对光栅的相对衍射效率进行了数值拟合计算, 数值拟合的结果与实验测量相吻合. 对结果进行了讨论.

1 实验装置

实验所使用的飞秒激光脉冲是由钛宝石啁啾脉冲放大技术(CPA)产生的脉冲宽度为200 fs、单脉冲能量100 μ J、脉冲重复率1 kHz、波长800 nm的飞秒脉冲激光^[9]. 将长方形透明介质(K9玻璃或ZK6玻璃样品)放置于可在一个三维步进式精密移动平台上, 移动平台X、Y、Z(垂直于水平面的方向)方向的步长分别为100 nm、125 nm和7 nm. 事先对长方形透明介质进行了六面抛光, 以便于从不同方向观察激光脉冲在透明介质内部导致的结构改变. 激光脉冲经过中性密度衰减片的衰减后, 用40倍(0.65-NA)的显微物镜将激光脉冲紧聚焦到样品体内指定位置处(表面以下170 μ m处). 通过计算得出, 脉冲激光在透明介质内聚焦光斑的直径为1.2 μ m, 在1 kHz的激光脉冲作用下, 为保证样品内结构改变在光栅条纹方向上是均匀的, 使样品沿着垂直于激光光束入射方向上以200 μ m/s速度匀速移动, 得到不同行间距(光栅常量)的衍射光栅. 图1为实验装置示意图.

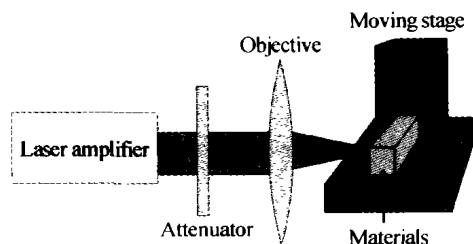


图1 产生折射率透射光栅的结构示意图
Fig. 1 Schematic of fabrication of transmission refractive index grating

* 中国科学院知识创新工程方向性项目(4001043)
Tel: 0951-8193819 Email: liuqing@opt. ac. cn
收稿日期: 2004-03-20

2 实验结果

2.1 在 K9 玻璃中刻写的光栅

用 40 倍、0.65-NA 的显微物镜将激光脉冲紧聚焦到 K9 玻璃中,形成透射式衍射光栅.入射到样品中的单脉冲激光能量为 300 nJ,条纹间距 d 为 $2\ \mu\text{m}$,图 2 是用安装在相位对比光学显微镜上的数码相机从平行与入射激光脉冲的方向拍摄到的图像.通过光学显微镜从侧面(垂直于入射激光脉冲的方向)观察,折射率改变区域的深度为 $45\ \mu\text{m}$.

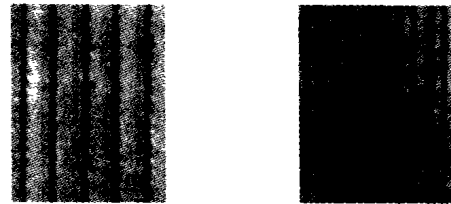


图 2 K9 玻璃中形成的光栅图像条纹间距 $2\ \mu\text{m}$
Fig. 2 Image of grating formed in K9, space between lines is $2\ \mu\text{m}$

2.2 在 ZK6 玻璃中刻写的光栅

将激光脉冲紧聚焦到 ZK6 玻璃中,单脉冲能量

300 nJ,样品的移动速度为 $200\ \mu\text{m}/\text{s}$,形成光栅常量 d 分别为 $5\ \mu\text{m}$ 和 $2.5\ \mu\text{m}$ 的衍射光栅,图 3 为其相位对比显微图像.从其侧面方向观察,其结构改变区域的深度为 $h = 25\ \mu\text{m}$.



(a)Space between lines is $5\ \mu\text{m}$ (b)Space between lines is $2.5\ \mu\text{m}$

图 3 ZK6 玻璃中的光栅图像
Fig. 3 Optical images of grating in ZK6

以上写入的所有光栅结构在常温下保持了三个月,未发现其衍射性质出现改变.

在 $635\ \text{nm}$ 的 He-Ne CW 激光照射下,得到光栅的远场衍射图像,用功率计测量各级衍射效率,表 1 给出了在 K9 玻璃中形成的透射式衍射光栅(图 2)的各级主极大的相对相对衍射效率(相对于零级主极大的衍射强度).

表 1 K9 玻璃中间距为 $2\ \mu\text{m}$ 光栅的衍射能级

衍射级	5	4	3	2	1	0	-1	-2	-3	-4	-5
效率(%)	1.06	1.31	9.84	19.61	52.06	100	57.8	9.4	6.42	6.22	1.03

3 讨论

由于超短脉冲激光与透明介质间的强烈的非线性相互作用,假定用实验描述的方法在介质中形成的光栅是相位变化为 p 阶超高斯型的相位光栅^[5].其相位随 y 的变化为周期为 d (条纹间距)的如下函数

$$\varphi(y) = \varphi_0 \exp\left(-\left(\frac{y-nd}{r}\right)^{2p}\right) \quad (1)$$

$$\left(\frac{2n-1}{2}d \leq y \leq \frac{2n+1}{2}d\right)$$

式中 n 为任意整数, φ_0 为最大相位变化值, r 是条形刻痕相位改变的 $(1/e)$ 半宽度, p 为正整数.通过计算这种空间周期性相位改变光栅光学传递函数的傅里叶变换,可以得到不同参量下各级衍射主极大的相对衍射效率.用式(1)对实验中测量的光栅相对衍射效率进行数据拟合,得出式(1)中的参量(φ_0 , r 和 p).在 SSR(数据与其拟合值差的平方和)最小的条件下,用式(1)对表 1 中数值进行拟合,得出最适合的超高斯型相位改变的参量为: $\varphi_0 = 1.946$, $r = 0.388\ \mu\text{m}$, $p = 5$.相应的最大折射率改变为 $\Delta n = \frac{\varphi_0 \lambda}{2h\pi} = 4.37 \times 10^{-3}$, h 为结构改变区域的深度.图 4 给出了 K9 玻璃中形成的光栅的相对衍射效率的测量值和数据拟合值.

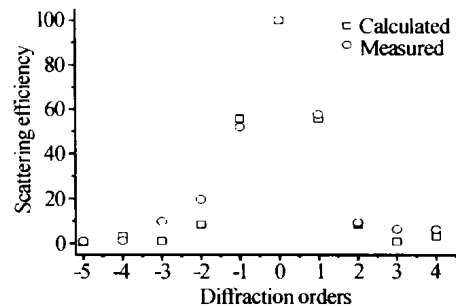


图 4 K9 玻璃中的相对衍射效率(圆形)和用高斯型折射率轮廓计算出的相对衍射图像(正方形)
Fig. 4 Diffraction pattern inside a K9 glass (open circle) and the calculated diffraction patterns assuming super-Gaussian index profiles (open square)

用同样方法,对 ZK6 玻璃中形成的光栅进行数据拟合计算,光栅常量(条纹间距)为 $2.5\ \mu\text{m}$ 的衍射光栅对应的超高斯型折射率改变区域的参量为: $\varphi_0 = 1.187$, $r = 0.319\ \mu\text{m}$, $p > 30$,对应的折射率改变为 $\Delta n = 4.81 \times 10^{-3}$ (ZK6玻璃的折射率为 1.6127).光栅常量为 $5\ \mu\text{m}$ 的衍射光栅对应的超高斯形折射率改变区域的参量为: $\varphi_0 = 1.219$, $r = 0.281\ \mu\text{m}$, $p > 30$,对应的最大折射率改变为 $\Delta n = 4.93 \times 10^{-3}$.

表 2 给出了数值拟合和实验观测结果之间的对比情况.计算出的条纹宽度 $(2r)$ 与用光学显微镜观测的结果基本吻合.这从侧面支持了折射率改变区域为超高斯型的假定.

表 2 数值拟合和实验观测结果对比

材料	光栅常量 / μm	条纹宽度 $2r$ (计算)/ μm	条纹宽度 $2r$ (测量)/ μm	单脉冲点 直径/ μm	条纹宽度与单 脉冲直径对比	最大折射 率改变 Δn
K9 玻璃	2	0.776	0.74	0.6	23%	4.37×10^{-3}
ZK6 玻璃	2.5	0.638	0.625	0.5	22%	4.81×10^{-3}
ZK6 玻璃	5	0.562	0.54	0.5	11%	4.93×10^{-3}

从对 ZK6 玻璃中光栅常量分别为 $2.5 \mu\text{m}$ 和 $5 \mu\text{m}$ 的拟合计算结果中发现,条纹间距为 $2.5 \mu\text{m}$ 的光栅条纹宽度较 $5 \mu\text{m}$ 间距的条纹宽度增加了 14%,这可以作如下解释,由于条纹间的相互影响,条纹间距较近时,形成的结构改变区域更宽.同样由于相邻脉冲产生的累计效果,光栅中的折射率改变区域的宽度(光栅条纹宽度)也较同样条件下单脉冲形成的圆柱形结构改变区域的直径更宽. ZK6 玻璃中折射率改变区域的宽度较(同样条件下)单脉冲形成的形结构改变区域的直径增加了 11%(光栅常量 $5 \mu\text{m}$)和 22%(光栅常量 $2.5 \mu\text{m}$); K9 玻璃中的折射率改变区域的直径较(同样条件下)单脉冲形成的形结构改变区域的直径增加了 23%(光栅常量 $2 \mu\text{m}$).由数值拟合计算得出 ZK6 玻璃中平均最大折射率改变为 $\Delta n = 4.87 \times 10^{-3}$,而 K9 玻璃中形成的最大折射率改变为 $\Delta n = 4.37 \times 10^{-3}$,因此在与飞秒激光脉冲的相互作用中, ZK6 玻璃较 K9 玻璃具有更强的非线性.

从理论上说,对于超高斯型相位光栅,要使得 1 级主极大的衍射效率最大,光栅的最大相位变化应该为 π . 因此,应该在制作光栅时通过增大最大折射率改变值 Δn 或增加折射率改变区域的深度 d 来改变最大相位变化的值 $\varphi_0 = \Delta n \times h$,使得光栅的 1 级衍射效率尽量大.

飞秒激光脉冲与透明介质的非线性相互作用机理十分复杂,我们已经在前文^[10]中进行了讨论.透明光学物质中的电子从价带到导带的电离能一般较高,一个红外光子的能量不足以将其电离.因此,在一般强度的激光照射下,表现出不吸收光能量的“透明”性质,但当激光脉冲的强度很高时,多光子电离和隧道电离发生的几率将大大增加(n 光子电离的几率与光强的 n 次方成正比)^[11].透明介质中形成的导带电子可以通过逆向韧致辐射吸收激光脉冲的能量,通过碰撞将其它原子或分子的价带电子激发到导带上,大量导带电子的形成将吸收激光脉冲的后续部分的大部分能量.这些具有较高动能的导带电子通过声子方式将能量传递给晶格,大量能量沉积到透明物质的局部区域,导致了透明物质中物理、化学结构的变化^[10].在透明介质吸收的激光能量较低时将导致介质的小的折射率发生改变,因

此使用能量接近与物质损伤阈值的脉冲激光能量可以用来形成光栅等光子器件;其折射率的改变可能是由于接近于阈值的激光能量,不足以导致物质中形成严重的结构改变,只能使的物质中的局部出现熔化,当物质冷却后就会形成折射率的改变.当入射的激光强度进一步增加时,将导致透明介质内部发生裂丝甚至出现微爆,在介质内形成一个空腔的结构,利用这种微爆点的高信噪比,可以进行高密度光数据存储^[10,12].由于微爆结构是由介质变密层(折射率增大)所包围的空腔,光线通过此区域会导致强烈的散射,光子器件或衍射元件的效率将急剧下降,在制作光栅时应保证激光能量不足以导致介质中出现裂丝和微爆.

从理论上说,对于超高斯型相位光栅,要使得 1 级主极大的衍射效率最大,光栅的最大相位变化应该为 π . 因此,应该在制作光栅时通过增大最大折射率改变值 Δn 或增加折射率改变区域的深度 d 来改变最大相位变化的值. 根据公式 $\Delta n = \frac{\varphi_0 \lambda}{2h\pi}$,要使得 $\varphi_0 = \pi$,需要使得 $2h\Delta n = \lambda$. 从 2.1 节光栅计算结果看, $\lambda = 635 \text{ nm}$, $h = 45 \mu\text{m}$, $\Delta n = 4.37\%$. $\varphi_0 = \frac{2\pi h \Delta n}{\lambda} = 1.946$,要达到 3.14,需要增加 Δn 或 h ,也可以通过减少波长的方法达到目的.

4 结论

将飞秒激光紧聚焦到透明介质中,将在透明介质中形成折射率改变区域,甚至形成微爆结构.利用飞秒激光与透明介质的这种非线性相互作用,在有效地控制入射光脉冲能量的情况下,可以在透明介质中形成周期性折射率改变的透射式相位光栅.

本文在 ZK6 玻璃和 K9 玻璃中,利用飞秒激光脉冲制作了局部呈超高斯型折射率改变的光栅结构,测量了在 635 nm 的 He-Ne CW 激光照射下这种超高斯形光栅的远场衍射效率,对其相对衍射效率进行了数据拟合计算.得到了形成的超高斯型折射率改变区域的各种参量,发现脉冲间的相互影响将导致折射率改变区域宽度的增大.给出了增大 1 级衍射效率的方法.

参考文献

- 1 Davis K M, Miura K, Sugimoto N, *et al.* Writing

- waveguides in glass with a femtosecond laser. *Opt Lett*, 1996, **21**(21):1729 ~ 1731
- 2 Miura K, Qiu J, Inouye H, *et al.* Photowritten optical waveguides in various glasses with ultrashort pulse laser. *Appl Phys Lett*, 1997, **71**(23):3329 ~ 3331
 - 3 Hirao K, Miura K. Writing waveguides and gratings in silica and related materials by a femtosecond laser. *J Non-Cryst Solids*, 1998, **239**(1-3):91 ~ 95
 - 4 Miura K, Inouye H, Qiu J, *et al.* Optical waveguides induced in inorganic glasses by a femtosecond laser. *Nucl Instrum Methods Phys Res B*, 1998, **141**(1-4):726 ~ 732
 - 5 Sudrie L, Franco M, Prade B, *et al.* Writing of permanent birefringent microlayers in bulk fused silica with femtosecond laser pulses. *Optics Communications*, 1999, **171**(5):279 ~ 284
 - 6 Cho Sung-Hak, Kumagai H, Midorikawa K. Fabrication of internal diffraction gratings in planar silica plates using low-density plasma formation induced by a femtosecond laser. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 2002, **197**(1-2):73 ~ 82
 - 7 Efimov O M, Glebov L B, Smirnov V I. High-frequency Bragg gratings in a photothermorefractive glass. *Optics Letters*, 2000, **25**(23):1693 ~ 1695
 - 8 Klein-Wiele J H, Marowsky G, Simon P. Subpicosecond time resolved ablation studies of submicrometer gratings on metals and semiconductors. *Appl Phys A*, 1999, **69**(Suppl.), 187 ~ 190
 - 9 Cheng Guanghua, Yu Lianjun, Wang Yishan, *et al.* *Chin Opt Lett*, 2003, **1**(4):225 ~ 227
 - 10 刘青,程光华,王屹山,等. 飞秒脉冲在透明材料中的三维光存储及其机理. *光子学报*, 2003, **32**(3):276 ~ 279
Liu Q, Cheng G H, Wang Y S, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(3):276 ~ 279
 - 11 Keldysh L V. *Sov Phys JETP*, 1965, **20**(5):1307 ~ 1314
 - 12 Cheng Guanghua, Wang Yishan, White J D, *et al.* Demonstration of high-density three-dimensional storage in fused silica by femtosecond laser pulses. *J of Appl Phys*, 2003, **94**(3):1304 ~ 1307

Fabrication of Internal Diffraction Gratings in Transparent Materials Using Femtosecond Laser

Liu Qing^{1,2}, Cheng Guanghua¹, Wang Yishan¹, Cheng Zhao¹, Ma Lin³, Zhao Wei¹, Chen Guofu¹

¹ State Key Laboratory of Transient Optics Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068

² Ningxia University, Yinchuan 750021

³ School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an 710071

Received date:2004-03-20

Abstract The fabrication of an internal transmission diffraction grating with laser induced refractive index modification was demonstrated in ZK6 and K9 glasses respectively, using femtosecond (200 fs) Ti: sapphire laser with a energy that is near the energy threshold focused by 40 × microscope objective with 0.65-NA. The diffraction efficiency of the grating was measured with a CW He-Ne laser at 633 nm. The diffraction efficiency of the phase gratings was calculated with curve fitting. The width of the groove calculated with curve fitting accord with that was measured, it is confirmed the premise of the phase shift of each groove approximated by a supergaussian indirectly. It is observed that a groove is widened by multiple-shot cumulative effect. A way increasing the diffraction efficiency is presented.

Keywords Femtosecond pulses; Optical grating; Diffractive efficiency; Transparent materials; Femtosecond pulses



Liu Qing was born in 1962. He graduated from physics department of Northwest University and got B. S. degree in 1984. He got M. S. degree in Xi'an Jiaotong University in 1987. His research interests include nonlinear optics, laser material processing, and three-dimension optical data storage.