

文章编号: 0258-7025(2010)07-1726-04

# 激光诱导金属铬膜可逆暗斑现象的实验研究

武腾飞<sup>1</sup> 周常河<sup>1</sup> 朱林伟<sup>1</sup> 樊仲维<sup>2</sup> 牛 岗<sup>2</sup> 麻云凤<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学开放实验室, 上海 201800)

<sup>2</sup> 北京国科世纪激光技术有限公司, 北京 100085

**摘要** 采用抽运探测光路, 实验研究发现飞秒脉冲激光和连续激光在铬膜表面抽运激发后, 当激光功率达到一定程度时, 在探测光的透射方向看到了明显的中心暗斑衍射现象。而在没有抽运光激发时, 这种暗斑衍射现象又消失。采用二元相位板的理论对这种可逆衍射现象进行了解释, 发现低能量密度的飞秒脉冲激光会比高能量密度的连续激光诱导更大的相位变化。实验结果和理论分析均有助于理解弱飞秒脉冲激光及连续激光和铬膜的相互作用的机制。

**关键词** 超快光学; 飞秒脉冲激光; 相位变化; 可逆; 中心暗斑衍射

**中图分类号** TN249; O484 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103707.1726

## Reversible Dark-Center of the Chromium Films Induced by Femtosecond Pulse and Continuous-Wave Lasers

Wu Tengfei<sup>1</sup> Zhou Changhe<sup>1</sup> Zhu Linwei<sup>1</sup> Fan Zhongwei<sup>2</sup> Niu Gang<sup>2</sup> Ma Yunfeng<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> *Laboratory of Information Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, China Academy of Sciences, Shanghai 201800, China*  
<sup>2</sup> *Beijing GK Laser Technology Co. Ltd., Beijing 100085, China*)

**Abstract** A pump-probe setup is used for experimental study and it is found that an obvious dark-center diffraction appears at the transmission direction of probe beam when the chromium films is excited by the femtosecond pulse laser and the continuous-wave (CW) laser and when the laser power reaches a certain level. While the dark diffraction phenomenon disappears without the pump beam. This reversible diffraction phenomenon is explained by using the binary phase plate theory. It is also found that the phase change induced by the femtosecond pulse laser is larger than that by the CW laser. The experimental and theoretical results can contribute to understand the mechanism of the interaction between the chromium films and the femtosecond pulse laser and the CW laser.

**Key words** ultrafast optics; femtosecond pulse laser; phase change; reversible; dark-center diffraction

## 1 引 言

近年来飞秒脉冲激光和物质的相互作用已经成为超快激光领域研究的热点话题。由于飞秒脉冲激光具有其他长脉宽激光无可比拟的优点, 如很小的热损伤效应, 接近甚至超过衍射极限的加工精度, 高的材料移除速度以及几乎可以加工任何材料等, 所以国内外很多课题组已经在飞秒脉冲激光微加工

领域开展了广泛的研究<sup>[1~7]</sup>。然而大多数飞秒脉冲激光的相关研究都集中在微焦、毫焦量级上, 研究纳焦量级的飞秒脉冲激光和金属铬薄膜体系相互作用的报道较少。韩泽华等<sup>[8]</sup>利用纳焦量级飞秒脉冲激光对镀有铬膜的玻璃和石英基片进行了微加工, 发现在铬膜表面出现 10~300 nm 不等的周期性微突起结构。他们还使用不同的偏振飞秒双脉冲对同样

**收稿日期**: 2009-09-18; **收到修改稿日期**: 2009-11-18

**基金项目**: 国家 973 计划(2006CB806000), 国家 863 计划(2008AA031901), 国家自然科学基金(60878035)和上海市科学技术委员会(07SA14)资助课题。

**作者简介**: 武腾飞(1983—), 男, 博士研究生, 主要从事飞秒信息处理技术方面的研究。E-mail: tengfei.wu@163.com

**导师简介**: 周常河(1966—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事衍射光学、微光学和飞秒信息处理技术等方面的研究。

E-mail: chazhou@mail.shnc.ac.cn(通信联系人)

材料进行微加工,报道了产生的微结构宽度与双脉冲时延没有明显的关系,而高度在 1~10 ps 的双脉冲时延范围出现很明显的下降<sup>[9]</sup>。

韩泽华等<sup>[8,9]</sup>在实验中使用的能量密度高于铬膜的烧蚀阈值的飞秒脉冲激光在其表面诱导出微纳结构。然而,低于铬膜烧蚀阈值的激光和铬膜作用的实验还未见报道,所以有必要开展这方面的实验研究。本文采用标准的抽运探测装置,实验观察飞秒脉冲激光和连续激光与铬膜的相互作用,并对此进行理论分析。

## 2 实 验

实验装置如图 1 所示,其中采用相干公司的钛

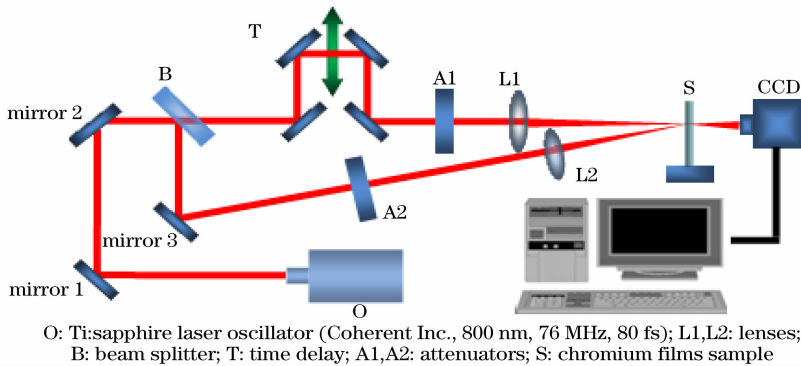


图 1 飞秒脉冲激光和连续激光诱导可逆暗斑现象的实验装置图

Fig. 1 Experimental setup for reversible dark-center of the chromium films induced by femtosecond pulse and CW lasers

## 3 结果与讨论

实验中飞秒脉冲激光被分束镜分为抽运光和探测光。探测光通过衰减器 A1 调节至 5 mW。然后通过调节衰减器 A2 逐渐增大抽运光的功率,当功率增大至 180 mW(即能量密度  $F_1 = 47.1 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ )时,通过 CCD 可以看到中心为暗斑的衍射现象,并且这种衍射现象随着抽运光的消失而消失,如图 2 所示。

作为对比实验,接着把飞秒脉冲激光改为连续激光,然后同样调节衰减器 A2 逐渐增大抽运光的

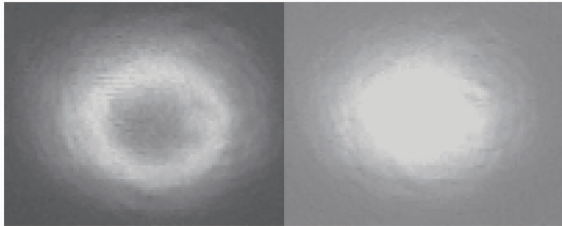


图 2 透射飞秒探测光可逆的中心暗斑衍射和亮斑的 CCD 图像

Fig. 2 CCD images of the reversible dark-center diffraction and bright-center of the transmitted femtosecond probe beam

蓝宝石飞秒脉冲激光振荡器作为光源,重复频率为 76 MHz。飞秒脉冲激光的中心波长和平均功率分别为 800 nm 和 530 mW。通过实验室自制的达曼 FROG 装置测得飞秒脉宽为 80 fs<sup>[10]</sup>。探测光和抽运光的功率可以通过衰减器 A1 和 A2 来调节。光路中透镜 L1 和 L2 的焦距分别为 0.2 m 和 9.5 m。铬膜样品购自湖南长沙韶光铬板有限公司,可以通过 Taylor Hobson 台阶仪精确测得铬膜的厚度为 100 nm。实验前在黄光下对铬膜使用丙酮和乙醇进行清洗。CCD 是用来采集探测光透射方向的衍射图像的。实验过程中温度保持在 300 K 左右,飞秒脉冲激光输出功率在 1.5% 附近波动。

功率,但是只有当功率增大至 200 mW(即能量密度  $F_2 = 52.3 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ )时,通过 CCD 才可以在探测光的透射方向看到中心暗斑衍射现象,并且这种现象随着抽运光的消失而消失,如图 3 所示,这也是一种可逆现象。值得注意的是,图 3 所示的探测光透射方向的 CCD 图像出现很多条纹状现象,可以认为这是由于连续激光较长的干涉长度造成的。以往关于飞秒脉冲激光与物质作用的实验和理论大多数都集中在材料的烧蚀阈值以上,大能量的飞秒脉冲激光直接导致物质属性的不可逆变化。很少关注弱光作

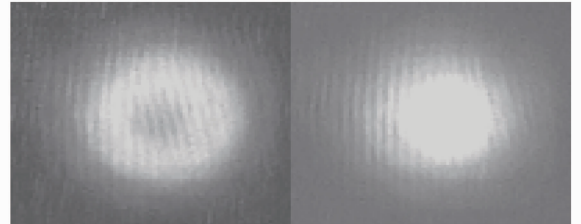


图 3 透射连续探测光中心暗斑衍射和亮斑的 CCD 图像

Fig. 3 CCD images of the reversible dark-center diffraction and bright-center of the transmitted continuous probe beam

用下物质的变化过程,此实验所看到的可逆中心暗斑衍射现象隐含着铬膜在飞秒脉冲激光和连续激光作用下内部存在一种可逆的物理机制。

双温模型可以较好地解释激光和金属作用的过程,按照双温模型的解释,可以认为铬膜内部包括电子和声子系统两部分。在飞秒脉冲激光的作用下,金属材料内部更多的电子从基态跃迁到激发态,可以导致金属材料折射率的改变<sup>[11~13]</sup>。当抽运激光的能量比较低还不足以使铬膜发生永久性变化时,随着抽运激光的消失,这种材料的折射率基本上恢复到初始值。而折射率的变化直接导致材料相位的变化。这种观点事实上已经反映了实验现象与“热效应”是相关的。

在连续激光抽运情况下,抽运激光和材料的作用就是典型的热传导过程,对这种可逆现象起作用的只能是“热效应”影响。不论在飞秒脉冲激光还是在连续激光抽运情况下,实验所观察到的现象都与“热效应”相关。针对实验现象,在理论解释中把抽运后的铬膜“简化”地看作“等效的二元相位板”(事实上,相位分布是很复杂的,可能是连续分布,但是理论上很难分析)。这种情况可能因为抽运激光中部光强比边缘的光强大,即铬膜抽运区域中部和边缘形成温度差,而材料的温度直接影响它的折射率,就导致了金属铬膜内部的折射率分布出现了圆形对称的差异分布,所以伴随连续激光产生的热效应也会等效地引起“二元相位板”的效应。当挡住抽运连续激光,热效应也随之消失,所以也不会产生“二元相位板”效应,中心暗斑衍射现象就消失了。

可以把抽运飞秒脉冲激光作用后的铬膜看作一个二元相位板。罗红心等<sup>[14]</sup>提出的二元相位板中间部分相位是 $\pi$ ,周围环状部分的相位是 $0$ 。但是在本文中由于抽运飞秒脉冲激光的光强呈高斯型分

布,最中间区域的能量密度很大,所以进行理论分析之前可以把抽运后的铬膜看作中间相位是 $0$ ,而周围环状部分相位是 $\varphi$ 的二元相位板。入射光波以平面波考虑,光波通过二元相位板后的幅度场分布可以表示为

$$\psi(\eta) = \frac{2J_1(\eta)}{\eta} - 2[1 - \exp(i\varphi)]\beta_1^2 \frac{J_1(\beta_1\eta)}{\beta_1\eta}, \quad (1)$$

式中 $\psi(\eta)$ 表示二元相位板后焦平面输出的光强, $\eta = \frac{2\pi R\rho}{\lambda z}$ 为归一化坐标, $R$ 为相位板出射光瞳的半径, $\lambda$ 为波长, $\rho$ 为在距离相位板 $z$ 处成像平面的横向坐标, $\beta_1 = 0.785$ 为相位板第一个环的归一化半径。容易得到二元相位板后的光强分布为

$$I(\eta) = \psi(\eta)\psi^*(\eta), \quad (2)$$

进而得到焦平面输出零级和一级的光强分布为

$$I_0 = 1 - 2\beta_1^2 + 2\beta_1^4 + 2(\beta_1^2 - \beta_1^4)\cos\varphi, \quad (3)$$

$$I_1 = \frac{4}{\eta_1^2} \{ [J_1(\eta_1)]^2 -$$

$$2(1 - \cos\varphi)\beta_1 J_1(\beta_1\eta_1)[J_1(\eta_1) - \beta_1 J_1(\beta_1\eta_1)] \}, \quad (4)$$

可以采用与文献[8]类似的方法,首先读取 CCD 暗斑图像的中心暗斑衍射光强的归一化分布如图 4 所示,然后通过模拟计算得到此时抽运飞秒脉冲激光在铬膜表面诱导的相位差为 $\varphi_1 = -161.1^\circ$ 。采用同样的方法可以得出连续激光在铬膜表面诱导的相位差为 $\varphi_1 = -154.8^\circ$ 。理论模拟的飞秒脉冲激光和连续激光探测光中心暗斑衍射光强的归一化分布如图 5 所示。通过对比发现飞秒脉冲激光由于其很高的峰值功率,比连续激光更容易在铬膜上诱导可逆的相位变化。由理论计算的 $\varphi_1$ 比文献[8]中所述的略小,通过分析可以认为是由于在 CCD 中采集的暗斑图像的差别造成的,这个差别和光路的调节及激光器的稳定性有很大的关系。

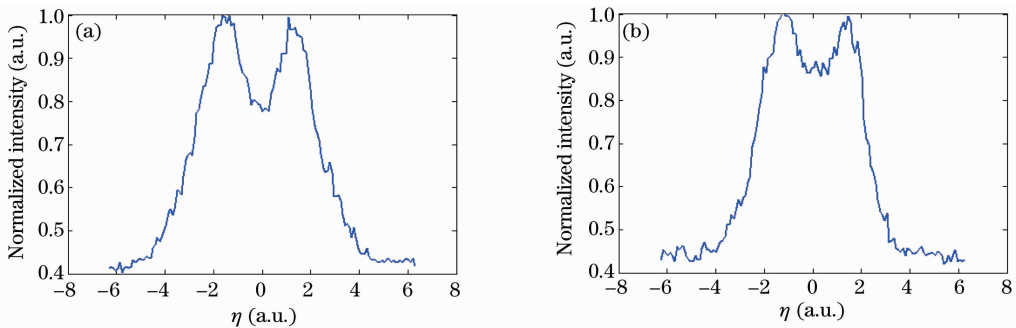


图 4 实验的飞秒脉冲激光(a)和连续激光(b)探测光中心暗斑衍射光强的归一化分布

Fig. 4 Experimental normalized distribution of dark-center diffraction of the femtosecond pulse laser (a) and the CW laser (b)

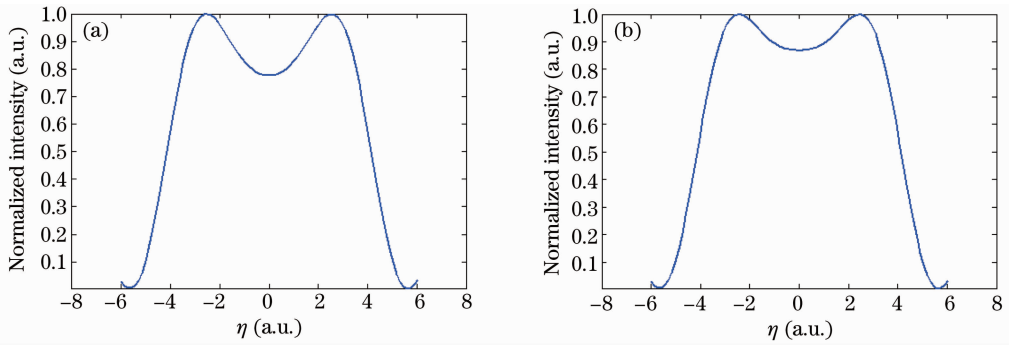


图5 理论模拟的飞秒脉冲激光(a)和连续激光(b)探测光中心暗斑衍射光强的归一化分布

Fig. 5 Theoretical normalized distribution of dark-center diffraction of the femtosecond pulse laser (a) and the CW laser (b)

## 4 结 论

实验通过传统的抽运探测光路,报道了飞秒脉冲激光和连续激光在铬膜表面抽运激发后,当飞秒脉冲激光功率增加到 180 mW(即能量密度  $F_1 = 47.1 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ ),连续激光功率增加到 200 mW(即能量密度  $F_2 = 52.3 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ )时,在探测光的透射方向看到了明显的中心暗斑衍射现象。而在没有抽运光激发时,这种暗斑衍射现象又消失。采用二元相位板理论对这种可逆衍射现象进行了解释。发现低能量密度为  $F_1$  的飞秒脉冲激光会比高能量密度  $F_2$  的连续激光诱导更大的相位变化。实验结果和理论分析有助于理解弱飞秒脉冲激光及连续激光和铬膜的相互作用的机制。

## 参 考 文 献

- 1 Chris B. Schaffer, Alan O. Jamison, Eric Mazur. Morphology of femtosecond laser-induced structural changes in bulk transparent materials[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **84**(9): 1441~1443
- 2 Alexander Q. Wu, Ihtesham H. Chowdhury, Xianfan Xu. Plasma formation in fused silica induced by loosely focused femtosecond laser pulse[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **88**(11): 111502
- 3 Qiang Zhang, Xingpeng Guo, Nengli Dai *et al.*. Corrosion and fatigue testing of micro-sized 304 stainless steel beams fabricated by femtosecond laser [J]. *J. Mater. Sci. Technol.*, 2009, **25**(2): 187~193
- 4 Yishuai Zhang, Xianfeng Chen, Hongyun Chen *et al.*. Surface ablation of lithium tantalite by femtosecond laser [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2007, **253**(22): 8874~8878

- 5 Sun Xiaohui, Zhou Changhe. Fabrication of microoptical elements with femtosecond laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(1): 133~137
- 6 孙晓惠,周常河. 飞秒激光加工微光学元件的研究[J]. *中国激光*, 2006, **33**(1): 133~137
- 7 Xiaohui Sun, Changhe Zhou, Huayi Ru *et al.*. Laser writing system for fabrication of diffractive optics elements[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(1): 4~6
- 8 Jin Xie, Changhe Zhou, Wei Wang *et al.*. Femtosecond laser induced microripple on PDMS surface [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(8): 715~717
- 9 Han Zehua, Zhou Changhe, Dai Enwen. Microripple structures induced by femtosecond laser pulses [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(5): 715~718
- 10 韩泽华,周常河,戴恩文. 飞秒激光诱导波纹状微突起结构[J]. *中国激光*, 2007, **34**(5): 715~718
- 11 Han Zehua, Zhou Changhe, Dai Enwen *et al.*. Micromachining with polarized light femtosecond double pulses [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(5): 768~771
- 12 韩泽华,周常河,戴恩文等. 偏振光飞秒双脉冲微加工[J]. *中国激光*, 2008, **35**(5): 768~771
- 13 Enwen Dai, Changhe Zhou, Guowei Li. Dammann SHG-FROG for characterization of the ultrashort optical pulse [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(16): 6145~6152
- 14 Jin Xie, Changhe Zhou, Enwen Dai *et al.*. Invertible dark-center diffraction of the metal film induced by femtosecond laser [J]. *Opt. Commun.*, 2008, **281**(21): 5396~5399
- 15 J. G. Fujimoto, J. M. Liu, E. P. Ippen *et al.*. Femtosecond laser interaction with metallic tungsten and nonequilibrium electron and lattice temperature [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1984, **53**(19): 1837~1840
- 16 H. E. Elsayed-Ali, T. B. Norris, M. A. Pessor *et al.*. Time-resolved observation of electron-phonon relaxation in copper [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(12): 1212~1215
- 17 Hongxin Luo, Changhe Zhou, Hua Zou. Highly sensitive wavefront sensor with a non-zero-order phase plate [J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(22): 4654~4658