

# 飞秒激光啁啾脉冲放大中压缩光栅的等离子体清洗

葛绪雷<sup>1,2</sup> 滕浩<sup>1</sup> 郑轶<sup>1</sup> 马景龙<sup>1</sup> 张伟<sup>1</sup> 毛婧一<sup>1</sup>  
陈黎明<sup>1</sup> 王兆华<sup>1</sup> 李玉同<sup>1</sup> 蒋刚<sup>2</sup> 贺端威<sup>2</sup> 魏志义<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>中国科学院物理研究所光物理重点实验室, 北京 100190)  
(<sup>2</sup>四川大学原子与分子物理研究所, 四川 成都 610065)

**摘要** 在飞秒太瓦激光装置中, 高效率的压缩光栅是获得高峰值功率飞秒激光输出的最重要光学元件之一。虽然光栅安装在无油的真空室内, 但当光栅受到强激光的辐照时, 真空中残存的气态有机物会被碳化并沉积在光栅表面, 使得光栅受到“污染”, 衍射效率大大降低。激光辐照累积的热量会导致光栅结构发生变化, 甚至会造成光栅的永久损伤。为此发展了用等离子体来清洗光栅表面污染层的方法, 实验结果表明该方法非常有效地清洗了光栅表面的污染, 提高了衍射效率并避免了光栅的损伤。该方法简单, 易于操作, 可以安装在压缩光栅真空室上, 在不影响真空室里面的光学元件情况下可以实现实时清洗。

**关键词** 光栅; 压缩光栅; 衍射效率; 等离子体清洗; 飞秒太瓦激光

**中图分类号** O539 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0402006

## Plasma Cleaning of Compressed Grating in Chirped-Pulse Femtosecond Laser Amplifier

Ge Xulei<sup>1,2</sup> Teng Hao<sup>1</sup> Zheng Yi<sup>1</sup> Ma Jinglong<sup>1</sup> Zhang Wei<sup>1</sup> Mao Jingyi<sup>1</sup>  
Chen Liming<sup>1</sup> Wang Zhaohua<sup>1</sup> Li Yutong<sup>1</sup> Jiang Gang<sup>2</sup> He Duanwei<sup>2</sup> Wei Zhiyi<sup>1</sup>  
(<sup>1</sup>Laboratory of Optical Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)  
(<sup>2</sup>Institute of Atomic and Molecular Physics, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China)

**Abstract** The diffraction efficiency of compression gratings in chirped-pulse amplification is very crucial to obtain terawatt femtosecond laser. Although the gratings are located in vacuum chamber with oil free, the gratings illuminated by laser beam are still subjected to carbon contamination in the vacuum condition, and results in degradation of diffraction efficiency. Moreover, additional energy deposition on the surface of grating will lead to irreversible changes of the grating structure or even catastrophic damage. A plasma cleaning technique is introduced to realize cleaning of carbon layer on the grating. The diffraction efficiency of grating is obviously improved after cleaning. It is demonstrated that the plasma cleaning is an effective on-line technique to repeatedly recover the high efficiency of compression gratings before damage occurs due to excessive carbon deposition.

**Key words** gratings; compressor grating; diffraction efficiency; plasma cleaning; terawatt femtosecond laser

**OCIS codes** 050.1950; 140.7090; 230.2035

### 1 引言

自啁啾脉冲放大技术<sup>[1]</sup>发明以来, 飞秒激光的放大已经实现了峰值功率达到几百太瓦(1 TW =

10<sup>12</sup> W), 甚至拍瓦(1 PW = 10<sup>15</sup> W)量级的输出<sup>[2]</sup>, 这样高功率的激光聚焦功率密度已经高达 10<sup>22</sup> W/cm<sup>2</sup> 的超相对论效应极端条件状态, 科学家

**收稿日期**: 2011-11-14; **收到修改稿日期**: 2011-12-23

**基金项目**: 国家自然科学基金(11074298, 10925421, 10974250, 91126008)、国家 973 计划(2007CB815104)和中国科学院科学仪器研究(2010004)资助课题。

**作者简介**: 葛绪雷(1988—), 男, 硕士研究生, 主要从事超短超强激光技术方面的研究。E-mail: gexulei19@163.com

**导师简介**: 滕浩(1972—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事超短脉冲激光方面的研究。

E-mail: hteng@iphy.ac.cn(通信联系人)

们利用这样的激光装置开创了新的研究领域—超相对论强场物理,并已经获得了很多有意义的物理实验结果<sup>[3]</sup>。峰值功率在太瓦级以上的激光装置中,由于系统由大量的光学元件组建而成,这些光学元件的效率以及抗损伤能力对于整个激光系统的运行以及保证满峰值功率的输出有着十分重要的意义。压缩光栅是最关键的光学元件之一,通常是镀金的全息光栅,该光栅的损伤阈值比较低(约 $200\text{ mJ/cm}^2$ ),虽然一级衍射可以达到 $93\%$ ,但由于要连续4次通过光栅衍射才能实现啁啾脉冲的压缩,所以光栅压缩器的整体传输效率在最好的情况下也只有 $75\%$ 。假设每块光栅的衍射效率平均下降到 $85\%$ ,则整体传输效率就会下降到 $52\%$ ,不能保证满峰值功率的输出,影响后续物理实验研究。

峰值功率达到太瓦量级的飞秒激光,在大气中传输时会由于非常严重的非线性效应而导致光束畸变;同时为避免灰尘以及水分等杂质的影响,所以压缩光栅都必须放置在真空室中。尽管压缩器的真空室加工时可以进行无油处理,而且真空泵也可以采用无油真空泵,但压缩光栅在使用一段时间以后,衍射效率仍会迅速下降。其原因是真空室内壁、机械元件、电子元件等或多或少地都附着一些有机物,这些有机物在真空条件下会逐渐挥发并沉积在光栅或其他光学元件的表面,当高功率的激光光束入射到光栅表面时,激光会将光栅表面沉积的有机层碳化并附着在光栅表面的作用区域内,光栅使用一段时间之后,可以观测到作用区域明显发黑。光栅表面上的碳化层在使用初期只影响衍射效率,但随着使用时间的增加,碳化层增厚,光栅刻线的结构会发生明显变化,碳化层增加了光栅表面对激光能量的吸收,可导致光栅表面平整度变差,严重影响高光束质量的获得。最严重的情况是碳化层达到一定程度后可以造成光栅的永久损伤。对于百太瓦和拍瓦量级的激光器,都必须采用大口径光栅,如果造成光栅的任何一小部分受到损坏,都会使得整个系统瘫痪,这种光栅极其昂贵,一般实验室无法承受其费用,所以压缩光栅的清洗和维护是太瓦激光系统特别是具有一定重复频率的激光系统中必须考虑的。

然而光栅表面的清洗是比较困难的,常规的光学元件清洗手段,比如擦拭、超声波和溶剂等都不适用于光栅,也不能将光栅从压缩器中拆出来单独清洗,因为压缩器中光路的准直和调节非常耗时,所以要在压缩器中不移动光栅和其他光学元件的情况下实现“实时”清洗非常必要。常用的清洗方法是用紫

外灯从真空室外照射光栅表面,同时给真空室充氧气,氧气在紫外光的辐照下产生臭氧,臭氧又与光栅表面碳发生反应生成二氧化碳并脱离光栅表面由真空泵抽走。这种方法有一定清洗效果,但清洗效率低、速度慢、花费时间长,不能达到完全清洗。本文发展了混合气体放电产生等离子体实现光栅表面清洗的方法,实验结果证明该方法是能大大提高光栅的衍射效率,清洗完全、有效,并能最终实现“实时”清洗的目的。

## 2 清洗原理与装置

等离子体清洗方法在很多领域都有应用,比如电子加速器的储存环中,由于X射线和自由电子对残存有机物的裂解,光学元件表面会不断地沉积碳,此碳化层可以采用等离子体清洗<sup>[4,5]</sup>;以及在电子显微镜中探针的清洗<sup>[6]</sup>;磁约束聚变装置中元件的清洗<sup>[7]</sup>等,甚至有商品化的等离子体清洗机。

在飞秒太瓦激光系统压缩器中,由于强激光的作用,使得光栅表面有机分子分解碳化并沉积在光栅表面,采用等离子体清洗的方法是可行的。混合气体放电产生等离子体清洗的原理是:在电源的激励下,低压的氧气和氩气的混合气体被电离,产生氧离子和氩离子。氧离子与沉积在光栅表面的碳化层发生化学反应,产生二氧化碳、一氧化碳等。氩离子在电场的加速下,物理轰击光栅表面,把顽固的碳化层分裂,并从光栅表面“剥离”出来,反应产生的各种气体污物,由大抽速的真空泵排出至真空室外,达到清洗的目的。

气体放电产生等离子体的方法<sup>[8]</sup>可以用高功率射频电源(比如常用的 $13.56\text{ MHz}$ )或者是中频电源( $20\text{ kHz}$ )。相对于高频电源来说,中频电源成本较低,操作简单,没有复杂的匹配电路,产生的离子能量比高频电源产生的离子能量大一些,能够有效地轰击光栅表面的碳层。而且产生的等离子体均匀性更好,更能有效地达到清洗目的。采用中频电源产生等离子体的方法,等离子体清洗装置由真空室、真空泵、中频( $20\text{ kHz}$ )电源、由铜丝缠绕的螺线状电极,以及氧气和氩气瓶组成,如图1所示。中频电源由一绝缘法兰接入到真空室中,为了获得均匀的气体放电,把电极设计成螺线管形状,放电在螺线管道中间形成,螺线管与真空室壁是绝缘的。将光栅安放在绝缘盒子中,只将光栅表面暴露出来,并安放在螺线管的中心,螺线管通电后,其内部区域气体放电产生等离子体,从而实现对光栅表面的清洗。

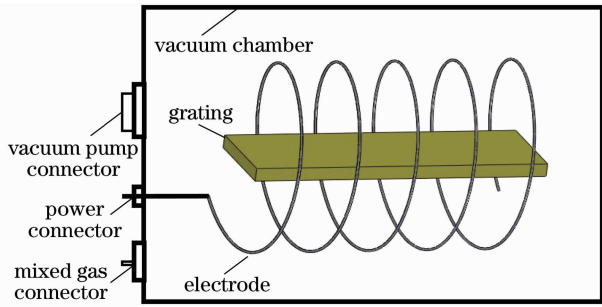


图1 等离子体清洗装置示意图

Fig. 1 Instrument of plasma cleaning

清洗时首先运行真空泵对真空室进行抽气,当真空室达到一定真空度后,由充气阀充入一定气压的氧气和氩气的混合气体,氧气与氩气的比例为5:3<sup>[9]</sup>,调节气体流量,使得真空室内的真空度保持在6 Pa左右,然后给放电线圈通入中频电源,当调节电源的输出功率到合适时,可以观察到在线圈盒子中有很浅的紫红色放电状态,证明产生了等离子体。实验中中频电源的输出功率为20 W,在保证放电稳定的前提下,增加电源功率可以节省清洗时间。

### 3 实验结果与分析

为了验证等离子体清洗效果,选用了一块使用过的、表面有污染的镀金光栅来进行清洗,该镀金光栅来自瑞典的Spectrogon公司。在清洗前,测试了该光栅面上不同位置处的衍射效率,如图2中的黑色曲线(before)所示。从图中可以看出此光栅在不同位置的衍射效率尽管有一定起伏,但平均效率约为86%,明显低于新光栅的衍射效率,而该类型的新光栅的衍射效率经过测试可以达到90%以上,这说明由于长时间的使用,镀金光栅表面由于碳化污染造成衍射效率降低。

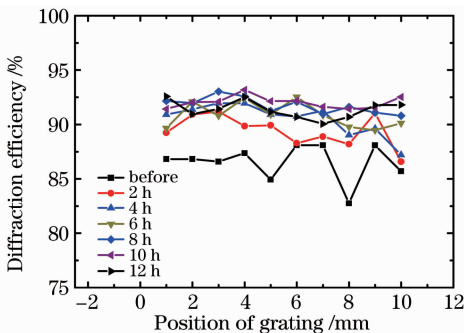


图2 光栅衍射效率随清洗时间的变化

Fig. 2 Grating diffraction efficiency with different plasma cleaning time

将旧光栅放置在等离子体清洗装置中进行清洗,每清洗2 h,测量光栅面上不同位置的衍射效

率,结果如图2所示。由图可见光栅面上不同位置处的衍射效率随清洗时间的增加而增加:在清洗2 h后的衍射效率提高到90%左右;当清洗8 h后衍射效率增加到93%,随着清洗时间的继续增加,衍射效率维持在93%左右,已经与新光栅的衍射效率相当,达到了最高的衍射效率。将光栅面上各个位置的衍射效率平均后获得光栅总的衍射效率与等离子体清洗时间的关系,如图3所示。可知整个光栅面内的平均衍射效率随清洗时间增加而增加,当清洗时间达到8 h后的衍射效率已经达到最大。该实验结果表明在等离子体清洗装置上用8 h的时间,就可以将污染光栅的衍射效率提高到新光栅的水平。清洗后的光栅表面在40倍镜头下观察,未见任何损伤。可见用等离子体清洗光栅“去污”效果是非常明显的,也未造成光栅损伤。

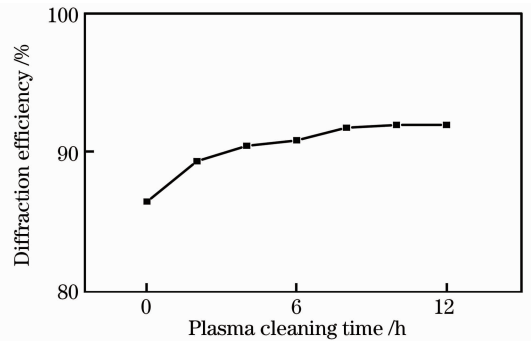


图3 光栅平均衍射效率与清洗时间的关系

Fig. 3 Average grating diffraction efficiency versus plasma cleaning time

图4为光栅经过等离子体清洗前后照片的对比(彩图见网络电子版)。图(a)为清洗后光栅表面照片,(b)为光栅未清洗部分照片。从图中可以很清楚地看到,光栅在清洗后,其表面很亮,颜色很浅,呈金黄色。而未清洗的光栅,表面颜色很深,这是因为光栅表面沉积的碳使其看起来发暗。

此外还有一个实验可以验证此装置对碳层的清洗效果,将画有炭黑线的载玻片放入清洗装置中,在清洗2 h后,对比观察载玻片前后的变化,见图5。图5(a)为清洗之前的照片,图5(b)为清洗之后的照片。可以发现清洗后炭黑色线的横条基本上消失,只有颜色很重,墨迹厚度很大的边缘还有一点点残留,实验表明等离子体清洗装置对碳层有很好的清洗效果。

为更进一步地验证清洗效果,采用连续辐射的X射线源(Ampetek生产的Mini-X,以银为阴极,射线能量范围为0~30 keV),对光栅表面成分进行了

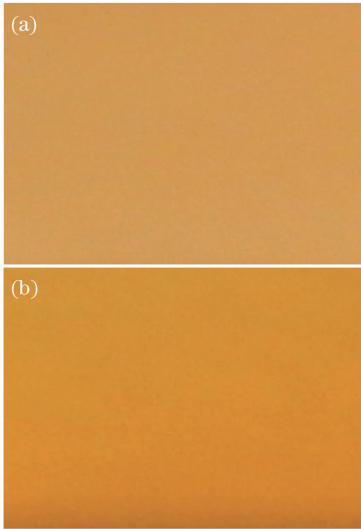


图 4 等离子体清洗后光栅照片的对比。(a)清洗后光栅表面照片;(b)未清洗光栅表面照片

Fig. 4 Comparison of photograph of grating surface before and after plasma cleaning. (a) After cleaning; (b) before cleaning

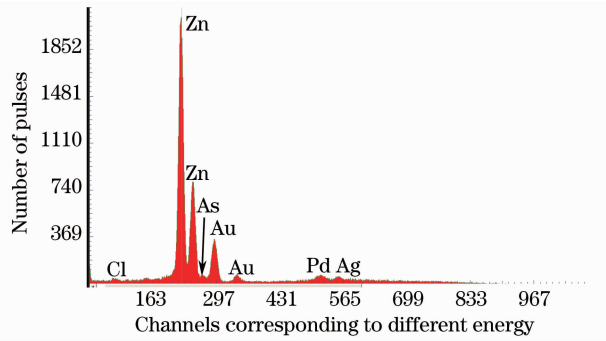


图 6 镀金光栅清洗后的 X 射线谱

Fig. 6 X-ray spectrum of the gold-coated grating after plasma cleaning

等离子体清洗光栅的方法,实验证明通过该方法清洗后光栅的衍射效率大大提高,可以恢复到新光栅的最高衍射效率,具有对光栅表面碳层显著的清洗效果,也避免了光栅的损坏,大大提高了光栅的使用寿命和太瓦激光系统运行的稳定可靠性。

### 参 考 文 献

- 1 D. Strickland, G. Mourou. Compression of amplified chirped optical pulses[J]. *Opt. Commun.*, 1985, **56**(3): 219~221
- 2 Sung Jae Hee, Lee Seong Ku, Jeong TM *et al.*. Design of a femtosecond Ti : sapphire laser for generation and temporal optimization of 0. 5-PW laser pulses at a 0. 1-Hz repetition rate [J]. *Journal of the Optical Society of Korea*, 2009, **13**(1): 53~59
- 3 G. A. Mourou, T. Tajima, S. V. Bulanov. Optics in the relativistic regime [J]. *Rev. Mod. Phys.*, 2006, **78**(2): 309~371
- 4 F. Eegenstein, F. Senf, T. Zeschke *et al.*. Cleaning of contaminated XUV-optics at BESSY II[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2001, **467**: 325~328
- 5 Wei Wei, Wang Qiuping, Wang Yong *et al.*. Plasma cleaning of contaminated optical components of synchrotron radiation beam-line [J]. *Vacuum Science and Technology*, 2009, **29**(6): 704~706
- 尉 伟, 王秋平, 王 勇 等. 等离子体清洗同步辐射光学元件 [J]. *真空科学与技术*, 2009, **29**(6): 704~706
- 6 A. E. Vladar, R. A. Vane. Active monitoring and control of electron beam induced contamination [C]. *SPIE*, 2001, **4344**: 835
- 7 Wang Zhiwen, Yan Donghai, Zhang Nianman *et al.*. Experimental studies on helium glow discharging cleaning in HL-1M Tokamak[J]. *Vacuum & Cryogenics*, 2002, **8**(2): 106
- 王志文, 严东海, 张年满 等. HL-1M 装置氦辉光放电清洗的实验研究[J]. *真空与低温*, 2002, **8**(2): 106
- 8 Qian Haijie, Liu Fengqin, Tao Xiaoping *et al.*. In-situ optical components cleaning by glow discharge[J]. *Vacuum Science and Technology*, 2001, **21**(2): 147~149
- 钱海杰, 刘凤琴, 陶小平 等. 弧光放电原位清洗光学元件[J]. *真空科学与技术*, 2001, **21**(2): 147~149
- 9 E. Gubbini, G. Kommol, M. Schnürer *et al.*. " On-line " cleaning of optical components in a multi-TW-Ti:Sa laser system [J]. *Vacuum*, 2006, **76**(1): 45~49

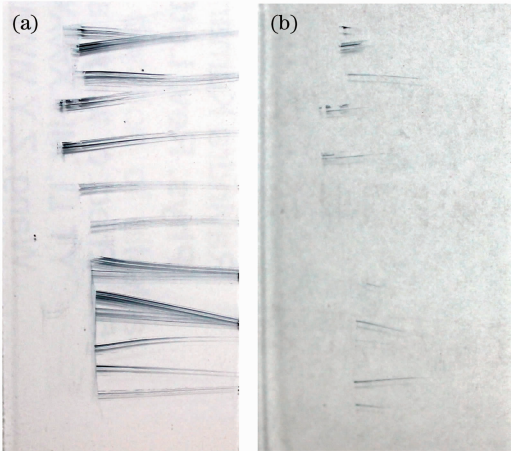


图 5 等离子体清洗前(a)后(b)载玻片的对比

Fig. 5 Comparison of photograph of slide glass with black ink before and after plasma cleaning. (a) Before cleaning; (b) after cleaning

荧光分析,该测试是在空气中进行的。把 X 射线源和接收器对准光栅的某一点, X 射线源距光栅 80 cm,接收器距光栅 4 cm,其测量结果见图 6。图中的几个荧光峰分别对应 Cl、Zn、Au、As、Pd 和 Ag 元素。测量结果中没有来自电极中的 Cu 元素。基于上述测量结果和衍射效率的提高,证实了该等离子体清洗装置在清洗时没有造成二次污染,也进一步印证了清洗效果。

## 4 结 论

发展了利用对氧气和氩气的混合气体放电产生