

光栅拼接技术研究进展

王聪^{1,2} 张军伟² 杜丽¹ 周海^{2*}

(¹ 电子科技大学机械电子工程学院, 四川 成都 611731
² 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要 大面积衍射光栅的研制一直是研究的重大课题之一,同时大面积衍射光栅的制作以及获取是光栅研制的一个技术难点,啁啾脉冲放大(CPA)技术的出现更加加剧了对米级光栅的需求。由于大口径光栅制造技术难实现和经济代价高昂的限制,因此采用拼接的方法增大光栅的尺寸成为公认的经济有效的途径。详细介绍了光栅拼接的理论研究,并在此理论指导下,重点介绍了光栅拼接的实验研究,这些研究包括拼接误差检测准直、拼接误差精密调整以及光栅稳定性控制研究。

关键词 光栅;啁啾脉冲放大;大口径光栅;光栅拼接;准直误差;稳定性控制

中图分类号 TN24 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.080501

Technology Progress of Grating Tiling

Wang Cong^{1,2} Zhang Junwei² Du Li¹ Zhou Hai²

(¹ College of Mechanical Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 611731, China
² Research Center of Laser Fusion, Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract The manufacturing of large-scale diffraction gratings is always one of great tasks, and how to obtain meter-sized is also a very difficult problem. The appearance of the chirped-pulse amplification (CPA) promotes the need of gratings. Because of technological and financial limit, an alternative to mosaic two or more gratings into an equivalent single grating is proposed. Theoretical research of tiled-gratings is described, and experimental studies which include alignment errors test, accurate adjustment and stability control are also introduced.

Key words gratings; chirped-pulse amplification; large-scale grating; grating tiling; alignment errors; stability control

OCIS codes 050.2270; 350.2270; 050.1950; 050.1590

1 引言

高能短脉冲激光装置是实现惯性约束聚变快点火的有力工具,啁啾脉冲放大(CPA)技术^[1]的出现,使得激光峰值功率由吉瓦量级提高到了太瓦量级,近年来甚至达到了拍瓦量级。采用啁啾脉冲放大技术的超短超强激光装置都利用衍射光栅对激光脉冲进行衍射补偿,其核心元件衍射光栅的损伤阈值和尺寸的大小直接决定了装置峰值功率的输出能力,因此,如何提高光栅的损伤阈值和尺寸成为了研究者们研究的目标。在提高损伤阈值方面,研究者们提出了多层介质膜光栅的概念^[2],它比镀金光栅具有更高的衍射效率和损伤阈值。在增加衍射光栅尺寸方面有两种途径:1)制造大口径的光栅蚀刻装置,如美国劳伦斯-利弗莫尔实验室(LLNL)为制作其 HEPW 项目所需 2 m 直径的衍射光栅已经建造了相应尺寸的离子束蚀刻装置^[3],该法工艺要求非常高且代价昂贵;2)利用拼接的方法将几块小光栅拼成一块大光栅^[4],由于小口径的衍射光栅制造

收稿日期: 2011-02-27; **收到修改稿日期**: 2011-03-23; **网络出版日期**: 2011-07-21

作者简介: 王聪(1986—),男,硕士研究生,主要从事光栅拼接控制技术方面的研究。E-mail: gswangcong@163.com

导师简介: 杜丽(1970—),女,副教授,主要从事机械结构动力学、机械系统可靠性设计与优化等方面的研究。

E-mail: lidu@uestc.edu.cn

* **通信联系人**。E-mail: nikooy@yahoo.cn

成本低且在技术上容易实现,该方法成为目前国际上许多高能量、高功率超短脉冲激光装置的首选^[5,6]。

拼接光栅的最早应用并非在超短脉冲压缩器内,而是在天文望远镜的光谱仪上^[7,8]。1998年,Zhang等^[9]首次在文献中提出用拼接光栅压缩啁啾脉冲的想法,将拼接光栅的应用扩展到超短脉冲的压缩器内。此后,短短几年内,包括理论和实验验证方面都取得了一些有意义的结果,这在一定程度上也促使很多高能拍瓦激光装置纷纷采用拼接光栅以满足系统对光栅尺寸的需求。

2 光栅拼接理论研究

衍射光栅在1786年被D. Rittenhouse^[10]发明以来到现今的刻划光栅、干涉光刻法制造光栅、闪耀全息光栅和两元相位光栅等,至今已有两百多年了。每一次理论上的突破和技术上的发展,衍射光栅的制造技术都会有大的改进。衍射光栅在向着高效率、多品种方向的发展的同时,大面积甚至超大面积光栅的研制技术也在不断向前发展,在此基础上,研究者们对光栅的理论研究也做了大量工作,尤其是在增大光栅面积方面,他们对拼接法获取大面积衍射光栅进行了大量研究。

2.1 国外理论研究进展

Zhang^[9]1998年提出了阵列型光栅压缩器的设计,详细讨论了各种角度误差对压缩脉冲远场时域的影响。T. Harimoto^[11]研究了单色光通过拼接光栅后的远场属性,为基于远场的拼接光栅的准直和监控方案提供了理论基础。

美国罗彻斯特大学的激光力能学实验室(LLE)最先在拼接光栅压缩器(即采用拼接光栅的啁啾脉冲压缩器)的理论和实验研究方面取得进展。在理论方面:1)提出准直误差和刻线宽度误差对衍射光束的影响是角度偏转和相位延迟两种基本效应,并推导了描述它们之间关系的解析表达式^[4];2)提出了配对误差补偿的准直方案,这方案增大了系统对于各种误差的容限,增大了用机械方法拼接光栅的可行性。

另外,德国GSI的PHELIX项目^[12],法国LULI实验室的PIC02000高能拍瓦项目^[13]的研究人员也都在进行拼接光栅压缩器方面的研究工作。

2.2 国内理论研究进展

赵博等^[14,15]进行了较早的拼接光栅方面的研究工作,通过理论推导得出了不同拼接误差对应的衍射波阵面间的相位差的表达式,建立了一维相位误差模型。

马雪梅等^[16]用夫琅禾费衍射的方法分析了拼接误差对衍射光束空间特性的影响。王道等^[17]从理论上提出了一种离线的实时监控方案,通过选择监控光的波长与入射角使得拼接误差对主激光和监控光的影响一致,并且在实验平台上验证了该方案的正确性。

另外,四川大学,中国科学技术大学,苏州大学等也在进行有关的理论和实验工作。

3 光栅拼接实验研究

在理论研究取得重大进展的同时,各国研究者们也在纷纷进行着光栅拼接的实验验证及实验研究工作,在光栅拼接误差检测、准直、稳定性控制等方面做了大量卓有成效的工作,推动了光栅拼接技术的向前发展,使得用拼接法获取米级衍射光栅成为了可能,也为皮秒级激光脉冲的获得提供了强大的技术保障。

3.1 光栅拼接误差检测及准直

LLE的J. Bunkenburg等^[18]成功地利用马赫-曾德尔干涉仪实现了全拼接光栅压缩器的准直和监控,如图1所示。其中(a)为电动机,(b)为红外激光器,(c)为拼接光栅参考镜,(d)为远场聚焦透镜,(e)为重叠间隙。并通过闭环控制实现了对光栅位置的自动控制,该方法对

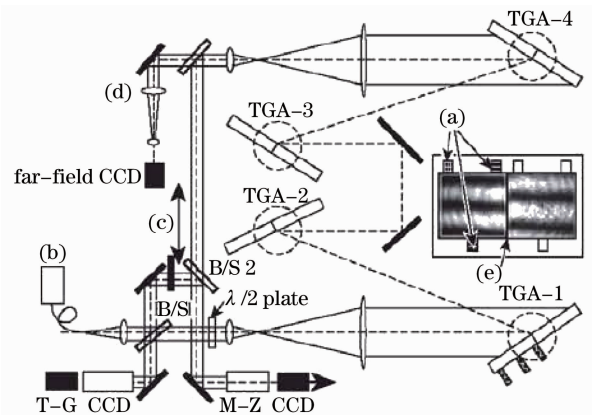


图1 光栅拼接准直监控系统

Fig. 1 Alignment inspection system of grating tiling

光栅拼接具有指导意义,但这并非实际意义上的实时监控,因为其实验用的监控光波长($1.5\ \mu\text{m}$)与主激光中心波长($1.053\ \mu\text{m}$)不一致,所以监测光并不能代表其真实的状态,这一点已被 M. C. Rushford 等^[19]所指出。

大阪大学激光工程研究所的研究人员进行了小口径拼接光栅压缩器的演示实验^[20],所用拼接光栅压缩器为双光栅双程构型,第二块光栅为拼接光栅,光束口径 6 cm。实验结果表明,拼接情况下的远场焦斑和压缩脉宽与非拼接情况并没有明显区别,如图 2 所示。目前日本正在开展快点火研究,其 FIREX-1 装置拼接光栅口径达到了 $1800\ \text{mm}\times 420\ \text{mm}$ 。

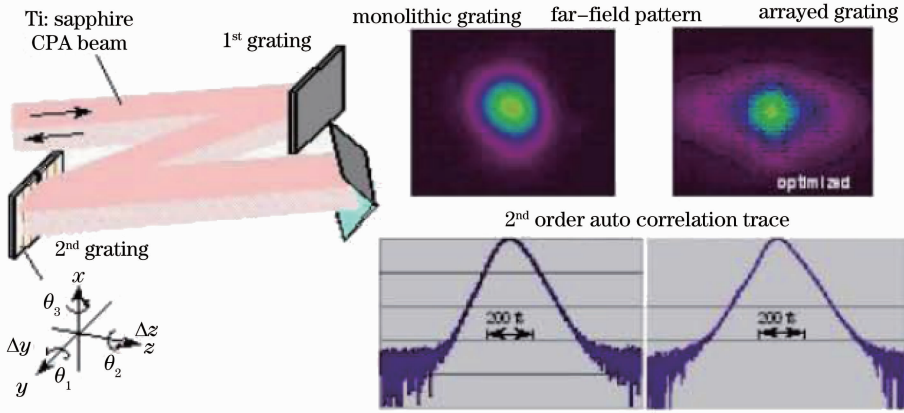


图 2 拼接光栅结构及结果示意图

Fig. 2 Structure and result diagram of tiling grating

曾理江等^[21]在消除拼接光栅之间的纵向和横向错位误差方面作了显著的工作,他们利用双波长外差干涉的方法实现了横向错位误差小于 1% 光栅周期的精度,其实验装置示意图如图 3 所示,然而,该实验给出的条件不够具体,文章中并没有指出如何实现光栅的严格平行以及光栅刻线宽度误差是如何考虑的。

李朝阳等^[22]在拼接误差减少方面提出了新的思路,他们通过采用一块反射镜来代替其中一块光栅,使光栅与其在反射镜中所成的像进行拼接,运用光栅子拼接技术可以节省一块光栅,把拼接的 6 个自由度误差减少到了 3 个自由度。此法虽降低了光栅拼接的维数,但对单自由度调整误差要求更高(经反射镜反射,误差变为原来的两倍),稳定性控制将变得更难,其实验原理如图 4 所示。

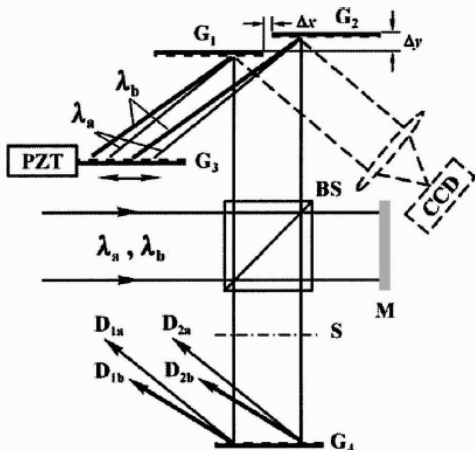


图 3 光栅拼接实验原理图

Fig. 3 Experimental principle diagram of grating tiling

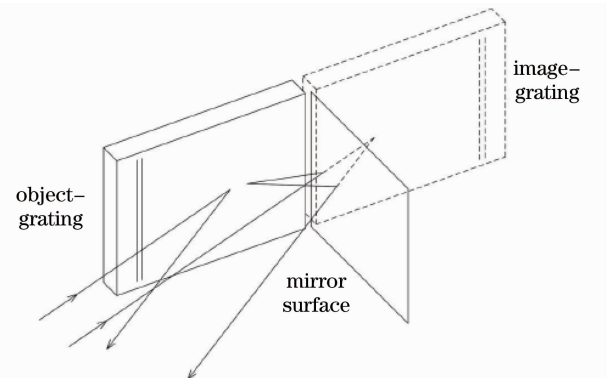


图 4 物像光栅自拼接

Fig. 4 Schematic of object-image-grating self-tiling

3.2 光栅拼接姿态检测及稳定性控制

为了达到拼接误差高精度的要求,拼接光栅对其周围环境提出了较高的要求,包括:恒温、洁净和真空等。但是保证这些环境的机器设备如真空机组、室内 HAVC 系统等又会对拼接光栅的稳定性带来影响,因此建立一套实时监控拼接光栅状态的监控系统是必需的。

目前光栅拼接姿态的检测主要是利用近场干涉图、远场焦斑或者两者相结合,并结合自相关仪、机械打

激光远场焦斑可保持稳定 20 min 左右,基本能满足装置打靶要求,在此时间内相位均方根值为 $0.03574 \times 2\pi$,结果如图 9 所示。

3.3 光栅激光致损伤监测系统

在激光脉冲压缩器中,压缩器的第四块拼接光栅承受最大的压缩能量,这往往会引起光栅激光致损伤,因此在压缩过程中需要对其进行检测。以往的文献报告中,并没有考虑到在拼接过程中对光栅进行损伤检查,文献[24]中,美国 LLE 实验室的研究者们为 OMEGA EP 装置发明了一套光栅检测系统 GIS,该装置运用对杂散光收集的暗场像系统来达到光栅的损伤检测(特征检测精度可达到 $250 \mu\text{m}$),其结构图如图 10 所示。该系统为光栅拼接提供了良好的技术保证,在对光栅潜在损伤进行检查的同时又不影响真空罐的环境和光栅拼接装置的准直,但该装置对其加工精度要求较高(在 1.5 m 的范围内,其直线度为 $100 \mu\text{m}$)。

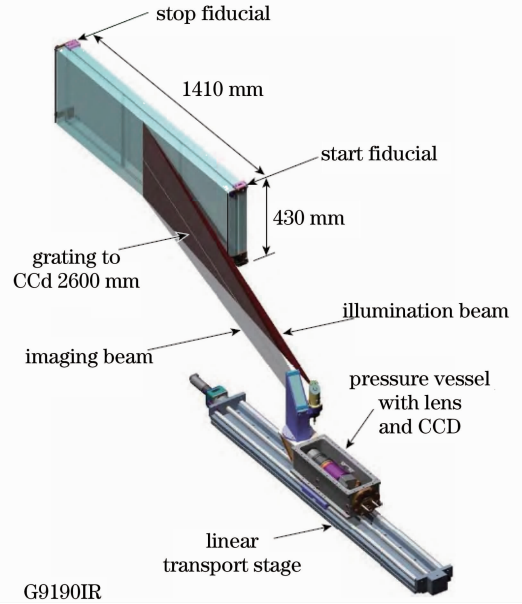


图 10 光栅检测系统原理图

Fig. 10 Grating inspection system diagram

4 结 论

目前,无论是刻划光栅还是全息离子蚀刻光栅,都受到加工技术、高昂经济成本条件等的限制,通过上述方法制造单一整块超过米级具有高效率、高损伤阈值的衍射光栅基本是很难实现的。因此,通过拼接的方法把几块小光栅拼接在一起形成一整块大口径光栅来获取大面积衍射光栅会受到越来越多研究者的青睐。

光栅拼接作为解决大口径光栅制造的有效手段之一,在理论研究基础的支撑下,实验研究也取得了非常显著的成就。但由于其对误差调整精度的高要求,很容易受到环境振动的影响,尤其是随着拼接光栅口径的增大,子光栅数目及组数的增加,其影响会更加显著,这对实时检测和控制提出了更高的要求。建立全自动的闭合回路控制系统,能实时监控和自动消除各种拼接误差以满足大口径或多组、阵列光栅拼接的要求,同时研究环境因素对拼接光栅稳定性的影响,弄清楚系统稳定时间时长时短的真正原因,延长稳定时间满足打靶要求是今后主要研究工作的方向。

参 考 文 献

- 1 D. Strickland, G. A. Mourou. Compression of amplified chirped optical pulses [J]. *Opt. Commun.*, 1985, **56**(3): 219~222
- 2 B. W. Shore, M. D. Perry, J. A. Britten *et al.*. Design of high-efficiency dielectric reflection gratings [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1997, **14**(5): 1124~1136
- 3 J. A. Britten. Manufacture of large-aperture diffractive optics and ultrathin optics for high-power laser and space applications[C]. *Optical Fabrication and Testing*, 2006
- 4 Laboratory for laser energetics demonstration of real-time phase-locked alignment of tiled gratings for chirped pulse amplified lasers[R]. *LLE Review*, 2005, **100**: 242~251
- 5 Y. L. Zuo, X. F. Wei, X. Wang *et al.*. Eliminating the longitudinal piston error between tiled gratings by angle tuning [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(3): 280~282
- 6 G. A. Brealey, J. M. Fletcher, E. H. Richardson. Adjustable mosaic grating mounts [C]. *SPIE*, 1980, **240**: 225~228
- 7 Tao Qingsheng. Tiled of diffraction grating [J]. *Astronomical Instrument and Technology*, 1985, (1): 38~52
陶庆陞. 衍射光栅的拼接 [J]. *天文仪器与技术*, 1985, (1): 38~52
- 8 E. H. Richardson. The spectrographs of the dominion astrophysical observatory [C]. *Journal of the Royal Astronomical Society of Canada*, 1968, **62**: 313~331
- 9 T. J. Zhang, M. Yonemura, Y. Kato. An array-grating compressor for high power chirped-pulse-amplification lasers [J]. *Opt. Commun.*, 1998, **145**(1-6): 367~376

- 10 M. C. Hardlei. Diffraction Grating [M]. Jia Huaiyi, Qin Xiaomei Transl. Guiyang: Guizhou People's Press, 1990, Chapter 1
M. C. 哈特雷著, 贾怀义, 秦小梅译.《衍射光栅》, 贵州人民出版社, 1990, 第一章
- 11 T. Harimoto. Far-field pattern analysis for an arrayed grating compressor [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2004, **43**(4A): 1362~1365
- 12 S. K. Borneis, R. Rock, E. Brambrink *et al.*. Status of PHELIX [G/OL]. 2006-11-06. <http://www.gsi.de/informationen/wti/library/plasma2004/PAPERS/EP-02.pdf>
- 13 A. Cotel. Multilayer dielectric grating compression for PICO2000 petawatt laser[R/OL][2007-01-02]
- 14 Zhao Bo, Hao Defu. Manufacturing large-size grating by mosaic way [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2000, **8**(5): 503~507
赵 博, 郝德阜. 用拼接法获取大面积衍射光栅 [J]. 光学精密工程, 2000, **8**(5): 503~507
- 15 Zhao Bo. Phase Matching of the Diffraction Gratings [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2000
赵 博. 衍射光栅的相位拼接[D] 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2000
- 16 Ma Xuemei, Dai Yaping, Zhu Jianqiang. Effect of tiling grating errors on lasers beam spatial distribution [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(2): 161~165
马雪梅, 戴亚平, 朱健强. 拼接光栅的偏差对光束空间特性的影响 [J]. 光学学报, 2006, **26**(2): 161~165
- 17 Xiao Wang, Qihua Zhu, Yanlei Zuo *et al.*. Matched wavelength and incident angle for the diagnostic beam to achieve coherent grating tiling [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(4): 241~243
- 18 J. Bunkenburg, T. Kessler, W. Skulski *et al.*. Phase-locked control of tiled-grating assemblies for chirped-pulse-amplified lasers using a Mach-Zehnder interferometer [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(10): 1561~1563
- 19 M. C. Rushford, W. A. Molander, J. D. Nissen *et al.*. Diffraction eigenvector for translational and rotational motion [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(2): 155~157
- 20 Y. Izava, K. Mirna, H. Azechi *et al.*. Laser fusion research with GEKKO-II and petawatt laser system at osaka[R/OL]. [2007-03-05]. http://www-pub.iaea.org/MTCD/Meetings/PDFplus/fusion-20-preprints/OV_3-2.pdf
- 21 Lijiang Zeng, Lifeng Li. Method to mosaic gratings by using a two-color heterodyne interferometer containing a reference grating [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(2): 152~154
- 22 Zhaoyang Li, Guang Xu, Tao Wang *et al.*. Object-image-grating self-tiling to achieve and maintain stable, near-ideal tiled grating conditions [J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(13): 2206~2208
- 23 Hideaki Habara, Guang Xu, Takahisa Jitsuno *et al.*. Pulse compression and beam focusing with segmented diffraction gratings in a high-power chirped-pulse amplification glass laser system [J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(11): 1783~1785
- 24 Laboratory for laser energetics grating inspection system for large-scale multilayer-dielectric gratings for high-energy laser systems [R]. LLE Review, 2010, **124**: 165~173