

# 超高强度激光脉冲压缩用衍射光栅\*

徐向东<sup>†</sup> 洪义麟 刘颖 傅绍军

(中国科学技术大学国家同步辐射实验室 合肥 230029)

**摘要** 衍射光栅是超高强度激光脉冲压缩器的核心元件之一,其高衍射效率、高损伤阈值和大尺寸的苛刻要求是普通商业光栅所远远不能满足的.文章对高强度激光超短脉冲压缩用衍射光栅的基本要求、主要类型、研究现状进行了综述.

**关键词** 高强度激光,镀金全息光栅,多层介质膜光栅

## Pulse compression gratings for ultrahigh power laser

XU Xiang-Dong<sup>†</sup> HONG Yi-Lin LIU Ying FU Shao-Jun

(National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230029, China)

**Abstract** A pair of diffraction gratings is one of the critical component for ultrahigh power laser, ultrashort pulse compressor. Their rigorous requirements, such as large area, high diffraction efficiency and threshold for optical damage, exceed commercially available ones. The basic requirements, main types and development of pulse compression gratings for ultrahigh laser are review.

**Keywords** high power laser, gold-coated holographic grating, multiplayer dielectric grating

## 1 引言

惯性约束聚变(ICF)是实现可控热核聚变的主要途径之一,是当今世界非常活跃且发展迅速的研究领域.对研究相对论等离子体物理、实验室天体物理学、高能密度下的材料特性,分析核武器性能以及保证核武器的库存和安全等都具有十分重要的意义,研究的最终目标是实现理想的聚变能源利用.

利用皮秒超短激光脉冲实施激光压缩靶丸区的快点火已经成为当今国际ICF前沿科学领域重点研究课题.建立在激光脉冲啁啾放大和压缩(CPA)基础上的亚皮秒或皮秒超短脉冲激光器(图1),是目前研究快点火物理的唯一重要的驱动器.CPA核心元件之一为衍射光栅,其高衍射效率、高损伤阈值和大尺寸的苛刻要求是普通商业光栅所远远不能满足的.美国里弗莫尔国家实验室(LLNL)是世界上唯一

能制作出94cm大口径镀金全息光栅的实验室.除了满足自己的需要,他们还为德国、日本和英国的拍瓦级激光装置提供大口径镀金全息光栅.目前,美国LLNL和法国J-Y公司重点致力于多层介质膜脉冲压缩光栅的制作,以进一步提高光栅衍射效率和损伤阈值.本文拟对高强度激光超短脉冲压缩用衍射光栅的基本要求、主要类型和研究进展进行综述.

## 2 光栅的基本要求

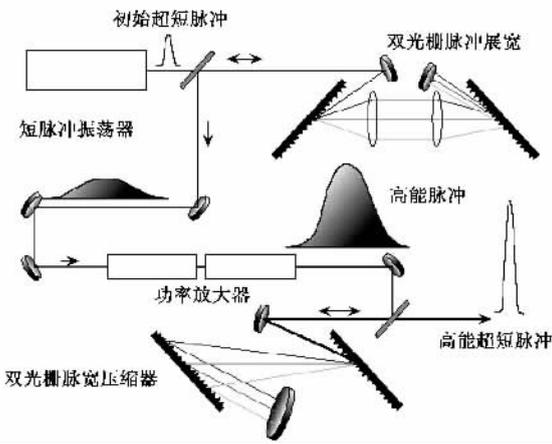
超强激光超短脉冲压缩对衍射光栅的基本要求是:

(1)光栅基底具有极高的表面平整度,光栅线

\* 国家高技术研究发展计划(批准号804-9-2)、国家自然科学基金(批准号50375149)资助项目

2004-11-27收到初稿 2005-03-17修回

<sup>†</sup> 通讯联系人, Email: xxd@ustc.edu.cn

图1 激光脉冲啁啾放大和压缩(CPA)系统<sup>[1]</sup>

条平直,利于产生近衍射限聚焦所要求的高质量衍射波前。因槽距的变化会引起衍射波前的像差,从而引起光谱的理想强度分布的偏离。随着光栅尺寸的增大,达到这些要求指标会愈来愈困难;

(2)高的衍射效率和高的光损伤阈值。对光栅衍射效率要求绝对效率高,在较宽的带宽内衍射效率保持常数。高衍射效率可以提高输出能量,而高光损伤阈值可以增加激光输入能量。

普通商业光栅是远远不能满足这些要求的。降低强激光脉冲对光栅损害的途径是:增加光栅尺寸,减少功率密度,使用具有很高损伤阈值的新光栅材料。

对图1中的双光栅压缩器,激光经过4次衍射(4通)输出,综合衍射效率为 $\eta^4$ 。如单块光栅的衍射效率为90%,则输出的综合效率为66%;如单块光栅的衍射效率为96%,则输出的综合效率为85%。

### 3 光栅的主要类型

由于刀具损坏等难以解决的困难,即使是世界最先进的技术水平,也不可能用机械刻划的方法制作出适合ICF要求的脉压光栅。全息干涉法及全息干涉法与离子束刻蚀相结合是目前制作ICF脉压光栅的最有效方法,基本制作方法见文献[2]。光栅制作所采用的技术并不难,难的是要达到它严格的技术要求,即每个工艺步骤都达到其极点。目前用于超强激光超短脉冲压缩的衍射光栅有两类:一是镀金全息光栅;二是多层介质膜光栅。现分别介绍如下:

#### 3.1 镀金全息光栅

镀金全息光栅是指在光刻胶浮雕光栅表面镀上金反射膜。此类光栅的特点靠金属的高电导率获取高反射率,而金属的欧姆损耗导致了金属光栅的低损伤阈值。衍射效率一般只能达到92%,最高为95%;损伤阈值 $\sim 0.5\text{J}/\text{cm}^2(\text{ps})$ 。为了满足拍瓦级激光超短脉冲压缩,镀金全息光栅尺寸要求很大,至少米级。大尺寸全息光栅制作的难点是如何保证高衍射效率及其均匀一致性,这与光刻胶膜层的涂制、长时间全息曝光的条纹稳定性和光强分布、显影过程中的光栅槽形控制等因素有关。目前LLNL可以制作出米级镀金全息光栅,J-Y可以制作0.6m的镀金全息光栅。

#### 3.2 多层介质膜光栅

多层介质膜光栅由两部分组成,即顶层的光栅浮雕结构和下层的多层介质膜堆垛结构,如图2所示。此类光栅的特点靠高反射率多层膜获取高反射率,采用抗损伤材料和通过膜系设计来获取高损伤阈值。只要构成膜系的两种材料折射率对比度足够高,膜层数足够大,很容易获得近100%的反射率。常用的高折射率材料为 $\text{HfO}_2$ (折射率为1.91),低折射率材料为 $\text{SiO}_2$ (折射率为1.45)。顶层材料可以是 $\text{HfO}_2$ 或 $\text{SiO}_2$ 。清华大学李立峰教授的大量数值模拟计算显示,决定多层介质膜光栅衍射效率的主要参数有三个:槽深 $h$ ,占空比 $\Delta$ 和剩余厚度 $t$ ,其中 $\Delta$ 定义为光栅线条的半高宽与光栅周期之比, $t$ 定义为光栅槽底部与膜系最上面一个界面之间的距离。除去参量 $h$ 和 $\Delta$ ,光栅的其他几何形貌细节对衍射效率的影响不大。

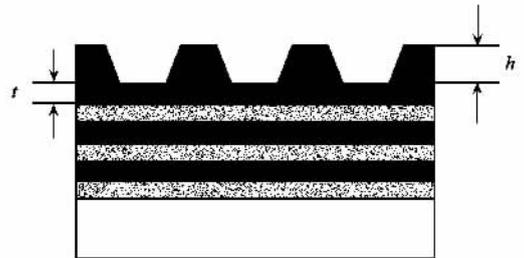


图2 多层介质膜光栅结构示意图

### 4 研究进展

国外的主要光栅制造商(法国的J-Y、德国的Carl Zeiss、美国的TermoRGL、日本的Hitachi和

Shimazu 等)都可以制作出高质量的非 ICF 用普通脉冲压缩光栅,尤其是 J-Y 已制作了大量的衍射效率在 90%—94% 的镀金全息光栅(最大面积约  $210 \times 420 \text{mm}^2$ )。高强度激光脉冲压缩用衍射光栅的研制工作,是与强激光装置的发展需求分不开的。LLNL 最先开展了用于高强度激光脉冲压缩衍射光栅的研究工作,至今已持续近二十年。

#### 4.1 美国的里弗莫尔国家实验室(LLNL)

LLNL 是世界上最早开展用于强激光脉冲压缩光栅的研制单位,早期主要与休斯公司(Hughes)等单位合作研制<sup>[1,3]</sup>。大约在 1996 年,衍射光学元件组才成为 LLNL 激光科学技术项目的一个专门研究组,其主要研究人员为:Mike Perry(为 PW 激光项目负责人及衍射光学元件组负责人,现已离开)、物理学家 Bruce Shore、激光工程师 Bob Boyd 和化学工程师 Jerry Britten(现为衍射光学元件组负责人)。相对于商业性的光栅制作公司,LLNL 的研究人员在其公开发表的有关光栅研制文献中,还是给出了相当部分工艺参数和实验结果。

##### 4.1.1 镀金全息光栅

LLNL 的工程技术人员从全息光栅的基本制作工艺着手,光栅尺寸由小到大,对决定镀金光栅衍射效率和损伤阈值的因素进行了系统的研究<sup>[3]</sup>。制作的镀金全息光栅在 1053nm 波长的实测衍射效率超过了 95%,对于 ns 级和亚 ps 级 1053nm 的激光脉冲,其损伤阈值分别达到了  $1.2 \text{J}/\text{cm}^2$  和  $0.4 \text{J}/\text{cm}^2$ ,已接近金的理论值( $1.5 \text{J}/\text{cm}^2$  和  $0.6 \text{J}/\text{cm}^2$ )。最大光栅尺寸已达到了直径 94cm。去年,他们提供给英国卢瑟福·阿普尔顿实验室(RAL)Vulcan 拍瓦激光装置两块直径为 94cm 的压缩光栅<sup>[4]</sup>,两块光栅的全口径衍射效率测量结果是:压缩激光束的使用区的平均衍射效率分别达到 92.8% 和 93.8%(对 1064nm 波长、 $54^\circ$  入射角),在使用区的外围尚有部分 80% 和 90% 的衍射效率,代表目前已制作出的米级光栅效率均匀性的最好水平。

##### 4.1.2 多层介质膜光栅

1991 年,Perry 等提出了以高反射率多层介质膜为基底的反射式脉冲压缩光栅设计<sup>[1]</sup>。由于介质材料对光的吸收比金属小得多,从理论上讲,这种新型光栅应具有很高的衍射效率和损伤阈值。1993 年,LLNL 和 Hughes 联合制作出第一块多层介质膜

脉冲压缩光栅,1053nm 其衍射效率为 97%(理论值 98%)。对于 300fs、 $1.053 \mu\text{m}$  的激光脉冲,其损伤阈值为  $0.6 \text{J}/\text{cm}^2$ ,但是光栅的几何尺寸并不大。1994 年,他们制作出  $150 \times 200 \text{mm}^2$  的多层介质膜光栅,为此获得 LLNL 的 1994 年 R/D100 奖。2001 年,多层介质膜光栅尺寸达到  $150 \times 355 \text{mm}^2$ 。

从相关文献可知,通过十多年的不断探索,他们的工艺技术路线已基本固化。针对国家点火装置(NIF)的高能拍瓦激光(HEPW)运行设计<sup>[5,6]</sup>,5kJ、10ps 激光脉冲需要长 2m 的衍射光栅,LLNL 已建成了能刻蚀 2m 光栅的反应离子束刻蚀装置。LLNL 近期多层介质膜光栅研制工作,是对已做的光栅进行损伤测试,以证实 NIF HEPW 装置设计;优化  $\text{SiO}_2$  和去除光刻胶的反应离子束刻蚀工艺参数,利用新的 2m 反应离子束刻蚀装置、已有的全息曝光系统、化学处理和计量检测设备,制作米级光栅。最终目标是为 NIF HEPW 提供光栅,它将是世界上最大的多层介质膜光栅。

图 3 为 LLNL 最近制作出的多层介质膜光栅<sup>[7]</sup>。其参数如下:尺寸为  $807 \text{mm} \times 417 \text{mm} \times 90 \text{mm}$ ,线密度 1780 线/mm,在 1053 nm 脉冲、 $73.5^\circ$  入射角、TE 偏振条件下的平均衍射效率为 91.5%,对 1053 nm、 $76.5^\circ$  入射角和 10ps 脉冲的损伤阈值为  $5 \text{J}/\text{cm}^2$ 。



图 3 LLNL 制作出的世界上最大的多层介质膜光栅

美国另一家可以制作用于强激光脉冲压缩光栅的研究机构是 General Atomic(GA)<sup>[8]</sup>,他们已建立两套光栅制作装置,可以制作镀金光栅(称为 apex laser gratings)和多层介质膜光栅(称为 pinnacle laser gratings),圆形或矩形光栅的最大口径可达 400mm,线密度为 1200—1800g/mm。目前尚未见其相关研制结果的报道。

#### 4.2 法国的 J-Y 公司

法国的兆焦耳激光装置( the laser megajoule )将是世界上最大的超高亮度激光器之一,除用于热核武器研究外,还可进行材料加工、X射线光刻以及使用超短X射线动态研究有生命和无生命物质。由于镀金光栅衍射效率有限(最高只有~95%),破坏阈值不够高,欧洲委员会大致在1998年启动了《用于超高亮度激光的光栅》的合作研究项目。参加这一工程项目的有三个欧洲国家的组织,包括法国原子能委员会阿基坦研究中心(主管这项协作)、法国帕来苏工业大学强激光应用实验室、英国卢瑟福·阿普尔顿实验室、德国耶拿大学和一些商业公司等。另外,为解决包括光栅在内的众多激光科学领域关键技术问题,他们与美国能源部进行合作,使双方可以共享资源,共用设备,使这些难题更易解决。从已有的文献资料<sup>[9,10]</sup>可知,德国的研究机构及Carl Zeiss主要是制作小尺寸(~60mm)的介质膜脉冲压缩光栅,给出较详细的工艺参数。目前处于验证他们的光栅优化设计阶段,尚无制作出大光栅的报道,但他们的研究方法和研究结果值得我们学习和借鉴。

法国的J-Y主要开展了用于兆焦耳激光器(LMJ)的小型样机——激光总装线(LIL)的大口径 $1\omega$ 和 $3\omega$ 透射光栅<sup>[11,12]</sup>,同时进行多层介质膜脉冲压缩光栅的新技术研究,有关文献中无任何工艺参数<sup>[13-15]</sup>。2001年的初步结果是:衍射效率已达95%—98%,损伤阈值与镀金光栅相比提高了2—3倍,尺寸较大( $120 \times 140\text{mm}^2$ )。2002年底制作出 $210 \times 420\text{mm}^2$ 的多层介质膜脉冲压缩光栅,光栅参数见表1。

表1 光栅参数

线密度	1740 线/mm
衍射效率	峰值为98%、平均为96%, 接近100%的理论值(1056nm)
多层介质膜	SiO <sub>2</sub> /HfO <sub>2</sub> 20层
顶层(光栅结构所在)	SiO <sub>2</sub>

现在,法国的J-Y采用全息离子束刻蚀技术,已能生产出用于强激光啁啾脉冲压缩的商品化大面积多层介质膜衍射光栅。

#### 4.3 光栅拼接

脉冲压缩光栅的口径和损伤阈值决定了拍瓦激光系统的短脉冲能量,大口径的光栅能进一步地扩展拍瓦激光系统的短脉冲能量。根据Barty<sup>[6]</sup>的报

告,美国NIF HEPW装置可能将需要超过米级的光栅。随着光栅尺寸的增大,光栅基底的厚度和重量会很大,那么大基片的镀膜、全息曝光和刻蚀等制作工艺难度非常大,很多技术问题尚未解决。为解决对大光栅的需求,由多块光栅拼接成一块大光栅,就成为提供米级多层介质膜光栅的另一途径。其关键问题包括高分辨和稳定的可调节支架、精密的准直设计方案和光栅截面损伤的控制。美国罗彻斯特大学的激光力能学实验室(LLE)在光栅的拼接方面作了很多有益理论和实验工作<sup>[16]</sup>。2003年上半年,LLE利用Fizeau干涉仪和焦面传感系统建立了光栅拼接的检测系统,对法国J-Y提供的一对 $165 \times 220\text{mm}$ 光栅(1740线/mm)进行了拼接实验,精度达到亚微米。实验结果显示,通过拼接光栅相对位置的精确控制以及拼接光栅压缩器的精确准直,得到了与传统单块光栅压缩器相同的压缩脉冲。在大量第一手经验的基础上,他们正进行3块光栅的拼接实验。

## 5 结束语

高强度激光脉冲压缩用衍射光栅的发展与强激光装置的发展需求是分不开的,其高衍射效率、高损伤阈值和大尺寸的苛刻要求是普通商业光栅所远远不能满足的。因此,美国LLNL最先开展了用于高强度激光脉冲压缩衍射光栅的研究工作,其发展过程是光栅尺寸由小到大,光栅类型由镀金全息光栅到多层介质膜光栅,损伤阈值逐渐增大,所研制的高强度激光脉冲压缩用衍射光栅代表了当前最高水平。法国J-Y公司作为世界上最领先的商品化光栅制造商,在欧洲委员会《用于超高亮度激光的光栅》研究项目的资助下,与美国能源部密切合作,在短短的几年内生产出用于强激光脉冲压缩的商品化大面积多层介质膜光栅。

## 参 考 文 献

- [1] Perry M. Science & Technology Review(LLNL), 1995, 9: 25
- [2] 徐向东,洪义麟,傅绍军等. 物理, 2004, 33(5): 340 [Xu X D, Hong Y L, Fu S J *et al.* Wul(Physics) 2004, 33(5): 340 (in Chinese)]
- [3] Boyd R D, Britten J A, Decker D E, *et al.* Appl. Opt. 1995, 34(10): 1697
- [4] Britten J A, Summers L, Hoaglan C *et al.* Meter-scale gratings delivered to Rutherford for petwatt laser upgrade. In: Laser Science & Technology Program Update - Oct. 2001, LLNL
- [5] Britten J A. Large-aperture reactive ion beam etcher (RIBE) operational for fabrication of meter-scale gratings for HEPW lasers. In: Laser Science & Technology Program Update-May 2003, LLNL

- [ 6 ] Barty C P J. Short pulse , high repetition rate laser technology issues for IFE FI. Snowmass 2002 Summer Fusion Study. July 10 , 2002
- [ 7 ] Multilayer Dielectric Diffraction Gratings for high - energy Petawatt lasers & high average power applications. <http://www.llnl.gov> Date Last Modified , July 21 , 2004
- [ 8 ] <http://photonics.ga.com/home.html> , Copyright 2003 General Atomics
- [ 9 ] Hehl K , Bischoff J , Mohaupt U *et al.* Appl. Opt. , 1999 , 38 ( 30 ) : 6257
- [ 10 ] Clausnitzer T , Limpert J , Zöllner K *et al.* Appl. Opt. , 2003 , 42( 34 ) : 6934
- [ 11 ] Flamand J , Villèle G , Josserand Y *et al.* SPIE , 2002 , 4411 : 190
- [ 12 ] Néauport J , Flamand J , Josserand Y *et al.* SPIE , 2004 , 5252 : 140
- [ 13 ] Touzet B , Flamand J , Bonnemason F *et al.* Higher damage threshold and efficiency gratings for laser pulse compression. IFSA2001. Second international conference on inertial fusion science and applications. Kyoto international conference hall Kyoto Japan , 9—14 Sept. 2001
- [ 14 ] Gilchrist J , Touzet B. Photonics Spectra , 2003 , 37( 1 ) : 93
- [ 15 ] Gilchrist J , Touzet B. Photonics Spectra , 2003 , 37( 9 ) : 68
- [ 16 ] The coherent addition of gratings for pulse compression in high - energy laser system. In : LLE Review , 96 : 207—211

· 物理新闻和动态 ·

## 在原子水平上观察快融化过程

2005年5月,在美国 Baltimore 召开的 CLEO/QELS 光学会议上,加拿大多伦多大学的 D. Miller 教授报告了他和他的同事们进行的一项实验工作.他们第一次在飞秒的时间范围内,在原子水平上观察到金属的融化过程.也就是说,迅速地对金属加热,并观察金属内原子发生的重排列过程.这项实验工作可以为科学家们提供物质在极端条件下状态变化的物理图像,也能使大家了解在行星内部的物质在处于熔化温度时的变化特征.

多伦多大学的研究组设计了如下的一个实验.利用一束高速的强激光脉冲去熔化靶物质,紧接着观察从靶物质原子处行射出的电子束,因为它们提供了该处原子在各个时刻的信息.实验观察结果修改了过去对快速融化发生的一些基本想法.他们将铝金属在 1ps 时间内迅速地加热到温度为 1000℃ 时,首先观察到以面心立方点阵排列的各个铝原子,在激光束的加热下发生了强烈的振动,其中处于点阵边角上的原子是最先发生振动的,然后就影响到其内部的相邻原子.现在研究组开始研究纯净碳的这种快速融化过程和相应的物态方程.因为碳的融化温度是非常高的,同时对碳融化过程的了解将有助于我们对在海王星和天王星内部是否存在液态碳之谜给出正确的答案.

(云中客 摘自 Physics News update 733 ,16 June 2005)

## 点阵阱对光学钟的改进

在时间标准的测定上,最经常使用的是铯-133 原子钟,它的测量精度可达到飞秒量级( $10^{-15}$  s).科学界曾经想使用光学钟来代替原子钟,但遇到的困难是由于光学钟的稳定性问题不易解决.现在日本东京大学与日本度量衡研究所的科学家的工作改变了这一情况.他们将 100 000 个冷冻到温度为 2μK 的铯原子云俘获在一维的光学点阵内,从而可以产生了一个稳定性很好的光学钟,其振荡频率为 429THz.点阵阱是由波长为 813.4nm 的光与镜面反射光形成的驻波所组成.所有原子都俘获在驻波波峰间的阱内.由于所有原子均处于峯间的阱内,因而就防止了原子间的振荡效应,这样就很好地解决了光学钟的不稳定性问题.另一方面,由于一次俘获的原子数比较大,就使原子发出的信号比较强,克服了过去单个原子光学钟信号较弱的缺点.这种由点阵阱所形成的光学钟,它的测量精度可达到阿秒量级( $10^{-18}$  s),也就是说它要比标准的原子钟提高几个量级.

(云中客 摘自 Nature , 2005 , 435 321)

## 面条的物理

当一根干的意大利面条弯曲得超过一定极限时,通常并不断成两半,而是断成从 3 段到 10 段不等的几段.这一现象在过去曾使物理学家们(包括诺贝尔奖获得者费曼)困惑不解.为了弄明白这一现象,法国 Paris 6 大学的 Basile Audoly 和 Sebastian 使用 Kirchhoff 方程模拟了细的弹性棒被弯曲时的情况.按照他们的研究结果,在细棒刚一断裂时,会沿着棒体产生弹性波,这些弹性波使棒的局部曲率增大,触发"雪崩"式的新的断裂.这些断裂又导致更多的弹性波,引起棒的碎裂.这两位法国物理学家通过拍摄意大利面条断裂时的高速影像证实了他们的预言.他们说,他们的模型可用于其他材料,如作为楼房和桥梁等建筑材料的玻璃纤维和金属棒,从而有助于改进建筑物的安全性.(有关论文发表在 Phys. Rev. Lett. 2005 , 95 : 095505)

(树华编译自 Physics web news , 1 September 2005)