

# 金属/介质膜脉宽压缩光栅研究进展

张文飞<sup>1\*</sup>, 孔伟金<sup>2</sup>, 李宗文<sup>1</sup>, 邢飞<sup>1</sup>, 张芳<sup>1</sup>, 葛筱璐<sup>1</sup>, 付圣贵<sup>1\*\*</sup>

<sup>1</sup> 山东理工大学物理与光电工程学院, 山东 淄博 255000;

<sup>2</sup> 青岛大学物理科学学院, 山东 青岛 266071

**摘要** 超短超高能量脉冲激光作为研究光和物质相互作用的有力手段得到了广泛研究。啁啾脉冲放大系统是产生这种激光的关键部分, 其中脉宽压缩光栅作为啁啾脉冲放大系统的核心组成器件, 具有至关重要的作用。金属/介质膜光栅具有高衍射效率、宽工作带宽、高激光损伤阈值等优良特性, 受到了广泛关注。详细综述了金属/介质膜脉宽压缩光栅的发展概况, 重点分析了金属/介质膜光栅的设计原理和制作工艺, 展望了金属/介质膜光栅的发展前景, 旨在增进对金属/介质膜脉宽压缩光栅的了解。

**关键词** 光学器件; 衍射光栅; 多层膜; 啁啾; 脉宽压缩

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP57.010004

## Research Progress of Metal/Multilayer-Dielectric Pulse Compression Gratings

Zhang Wenfei<sup>1\*</sup>, Kong Weijin<sup>2</sup>, Li Zongwen<sup>1</sup>, Xing Fei<sup>1</sup>,  
Zhang Fang<sup>1</sup>, Ge Xiaolu<sup>1</sup>, Fu Shenggui<sup>1\*\*</sup>

<sup>1</sup> School of Physics and Optoelectronics Engineering, Shandong University of Technology,  
Zibo, Shandong 255000, China;

<sup>2</sup> College of Physics, Qingdao University, Qingdao, Shandong 266071, China

**Abstract** Ultra-short and ultra-high-energy pulsed laser is a powerful tool for investigating the interaction between laser and matter, and they have thereby been extensively investigated. A chirped-pulse amplification (CPA) system is the critical component for generating ultra-short and ultra-high-energy laser pulses. A pulse-compression grating (PCG) is an essential part of CPA, and it plays an important role in CPA performance. Metal/multilayer-dielectric gratings (MMDGs) have attracted considerable attention owing to their characteristics of high diffraction efficiency, broad bandwidth, and high laser-induced-damage threshold. To improve the understanding of metal/multilayer-dielectric pulse compression grating, we provide a comprehensive review of the status, design principles, and manufacturing processes of MMDGs. Finally, we discuss the prospects for future developments of MMDGs.

**Key words** optical devices; diffraction gratings; multilayer film; chirping; pulse compression

**OCIS codes** 230.1950; 230.4170; 050.1590; 310.6845

## 1 引言

高能激光与物质相互作用下的各种独特现象和高能激光的工业应用, 使得超短高能脉冲激光器的应用范围不断扩大。啁啾脉冲放大(CPA)系统是产生超短高能脉冲激光的关键<sup>[1-2]</sup>, 其核心元件是

用于展宽和压缩激光脉冲的脉宽压缩光栅(PCG)。由于超短高能脉冲激光的高能量对 PCG 的性能要求极高, 因此选择合适的压缩光栅对于 CPA 系统来说尤为重要。现有的 PCG 主要有三种类型: 镀金光栅(ACG)<sup>[3-5]</sup>、多层介质膜光栅(MDG)<sup>[6-18]</sup>和金属/介质膜光栅(MMDG)<sup>[19-44]</sup>。由于金属对光的吸收作用,

收稿日期: 2019-04-10; 修回日期: 2019-06-17; 录用日期: 2019-07-09

基金项目: 国家自然科学基金(11704227, 11704226)、山东省自然科学基金(ZR2017MA051)

\* E-mail: zhangwenfei@sdu.edu.cn; \*\* E-mail: fushenggui@sdu.edu.cn

ACG 的激光损伤阈值 (LIDT) 受到了一定的限制。MDG 和 MMDG 具有高衍射效率、高 LIDT、大入射口径和设计灵活等优点,得到了广泛的应用。MDG 的设计理论已经较为成熟,近年来主要研究通过其制作工艺来提高其整体的 LIDT<sup>[10-18]</sup>。相比于 MDG, MMDG 结合了金属的宽光谱特性及 MDG 的高衍射效率和高 LIDT 的特性,具有更宽的高衍射效率光谱工作带宽,这对于脉冲更短的飞秒激光,甚至于阿秒激光脉冲产生系统来说是非常重要的。本文将详细综述目前国内外在 MMDG 设计理论和制作工艺方面的研究进展,这将有助于增进人们对 MMDG 的全方位快速了解和掌握。

## 2 PCG 及其性能要求

### 2.1 CPA 系统

在 CPA 技术出现之前,激光的峰值能量的提高在很长一段时间内都受到了限制,直到 1985 年 CPA 技术的出现,这一瓶颈才被打破了<sup>[1]</sup>,并使得激光脉冲能量得到了大幅提高,到目前为止,激光的峰值功率提高了近 10 个量级。为了表彰 CPA 技术对超短高能量激光发展所起到的作用,其提出者 Strickland 和 Mourou 获得了 2018 年度的诺贝尔物理学奖<sup>[45]</sup>。

CPA 技术的基本工作原理如图 1 所示,其整个过程可以简述如下:1) 脉冲展宽。首先由超短锁模振荡器产生低能量的超短脉冲,脉冲宽度与激光工作物质相关。这时,使用光栅脉冲展宽器将超短脉冲色散调频成长脉宽的啁啾脉冲,啁啾脉冲的宽度一般在 100 ps~3 ns,具体宽度取决于增益介质的饱和能流密度和超短脉冲宽度,脉冲的峰值功率也相应下降几个量级。2) 脉冲放大。使用一级或多级激光放大器将长脉宽的啁啾脉冲放大,通常需要使激光脉冲反复通过放大介质 10~100 次,从而使激光获得足够高的能流密度,并有效地从放大器中抽取能量。3) 脉冲压缩。激光放大结束以后,经 PCG 将已经携带足够能量的激光脉冲还原压缩为接近原来脉冲宽度的脉冲。利用 CPA 和压缩技术,可以获得在皮秒时间内提供拍瓦( $10^{15}$  W)能量的激光,整个过程既保证了输出脉冲的高能量,又避免了高能量所造成的非线性效应和各元器件的损伤。

### 2.2 PCG 性能要求

CPA 系统的核心元件是用于展宽和压缩激光脉冲的 PCG。由于 PCG 工作在高功率激光系统中,因此其性能直接决定了整个系统的工作效率和工作寿命。特殊的工作环境要求 PCG 具有以下性

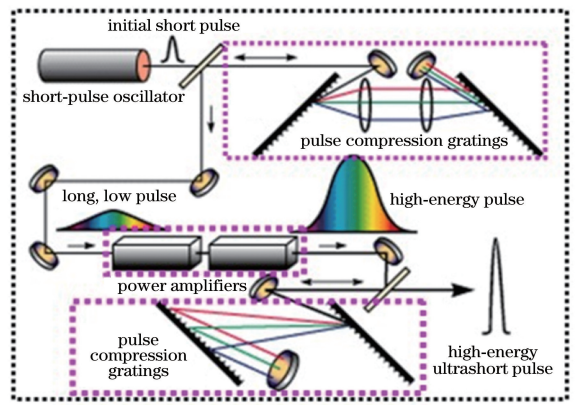


图 1 CPA 系统工作原理示意图

Fig. 1 Schematic of operating principle of CPA

能特点:1) 高衍射效率。衍射效率是衡量 PCG 性能最重要的一个指标。由 CPA 系统工作原理图可以看出,在整个激光脉冲展宽-放大-压缩的过程中,脉冲至少要先后 4 次经过光栅的反射衍射。在忽略整个过程散射、吸收的情况下,整个系统的最终效率是光栅衍射效率的 4 次方,假设每个光栅的衍射效率为 90%,那么最终所得的效率为 65.6%,而如果能将光栅的衍射效率提高到 96%,则最终所得的效率可提高至 85%。因此,提高 CPA 系统中 PCG 的衍射效率对于提高整个激光产生系统的能量转换效率来说具有重要的意义。2) 高 LIDT。作用于 CPA 系统中 PCG 上的光是高功率光束,脉冲能量很高,因此 PCG 要有较高的抗激光破坏能力,即高 LIDT,以确保整个 CPA 系统的稳定工作。3) 宽光谱带宽。随着脉冲宽度的不断缩小,其频谱也变得更为丰富,对展宽和压缩脉冲激光的光栅提出了更宽的工作带宽要求,其必须在足够宽的光谱范围内具有高衍射效率,以保证脉冲的完整性。

## 3 金属/介质膜 PCG

### 3.1 MMDG 结构模型

MMDG 一般由基底、金属反射膜、介质膜和浮雕结构构成,其结构如图 2 所示,主要分为三个部分:1) 最底部为承载整个光栅的基底,一般是熔石英光学玻璃;2) 中间由交替的高低折射率材料和金属层组成的高反射层 (MMLD), MMLD 可以在较宽的光谱范围内为光栅提供高反射率,  $t_L$  和  $t_H$  分别是低折射率材料和高折射率材料的厚度;3) 最上层是经过全息曝光刻蚀形成的浮雕结构和未被刻蚀的剩余厚度层,  $\Lambda$  为光栅周期,  $f$  为占宽比,  $f\Lambda$  为光栅脊的宽度,  $h$  为光栅槽深,  $t_r$  为顶层剩余厚度,光栅的衍射性能主要取决于浮雕结构的参数。

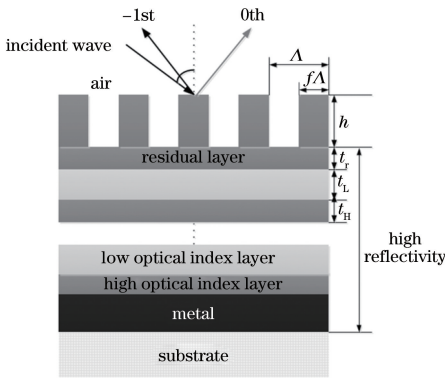


图2 MMDG结构示意图

Fig. 2 Schematic of MMDG structure

MMDG与MDG的本质区别在于中间的高反射层结构,MDG的高反射层完全由高、低折射率的介质材料交替镀制而成,一般膜的层数较多,而MMDG的高反射层仅由少数几层高、低折射率介质材料和一层金属膜组成。由于金属具有宽带反射特性,因此MMDG比MDG有更宽的高衍射效率带宽。同时,MMDG的膜层总数比MDG少很多,可以有效减小光栅内部的应力,使整个光栅具有良好的工作性能和寿命。

### 3.2 MMDG理论基础

常用的光栅衍射理论主要有标量衍射理论和矢量衍射理论。由于光栅的周期与入射波长量级相当,因此必须用严格的矢量衍射理论来对光栅特性进行计算和分析。目前,在多层膜光栅分析中应用的均是严格耦合波方法<sup>[46-48]</sup>,其基本原理是对光栅衍射的电磁场建立Maxwell方程组进行准确求解。该方法计算简单,物理概念直观,不用迭代,计算结果的准确度完全取决于能量守恒和场的空间谐波级数展开数目,现已被用于分析反射光栅、平面光栅、二维表面浮雕光栅、任意形状介质金属光栅、各向异性光栅等几乎所有光栅。

### 3.3 MMDG研究进展

MMDG的结构模型最早由Bonod等<sup>[19]</sup>于2006年提出:在基底上先镀制一层金属膜,利用金属膜代替MDG结构中的一部分介质膜层,从而有效减少整个光栅结构的膜层数量,进而减少膜堆内部的机械应力,在不影响光栅光学性能和LIDT的前提下防止光栅破裂,使光栅的性能更稳定、寿命更长。基于严格微分方法,提出一种可以有效优化光栅结构参数的数值方法:首先考虑光栅的衍射性能,然后考虑光栅制作过程的工艺可操作性,最后考虑光栅结构中的电场分布特性,对表面浮雕结构参数

(剩余厚度、槽深、槽宽、倾斜角)进行优化,选取最佳参数组合。计算结果表明,利用金属膜层可以使介质膜的层数由9对减少为7对。这为MMDG的研究奠定了理论基础。之后,Néauport等<sup>[20-22]</sup>对MMDG进行了深入研究。

2007年,研究者意识到当激光脉冲的脉宽进一步缩小至飞秒量级时,光谱带宽会达到100 nm甚至200 nm,此时MDG的高衍射效率工作带宽已远不能满足性能的要求。考虑到金属膜层的宽带平坦反射特性,Flury等<sup>[23]</sup>报道了在800 nm处可以实现200 nm带宽内横电(TE)光束衍射效率超过95%的MMDG,在实验上,其-1级衍射效率最大可以达到98%,且具有较宽的高衍射效率带宽(图3)。这为通过CPA实现20 fs的脉冲激光提供了可能。Canova等<sup>[24]</sup>指出MMDG的制作过程可能存在以下几方面的困难:1)金属和介质层之间没有连接层,可能会导致层裂现象发生;2)MMDG不能通过高温退火处理来消除介质层中可能存在的缺陷;3)在有高折射率背景材料的情况下进行干涉曝光是很难的,导致MMDG混合结构的制作困难;4)制作过程中为了保证金属膜层表面的完整性,刻蚀过程中化学试剂和溅射使用的条件被大大限制。尽管存在诸多制作困难和影响因素,但MMDG的LIDT测试结果仍表明,其LIDT基本与MDG相当,金属层的引入并没有对光栅的LIDT造成影响(表1)。

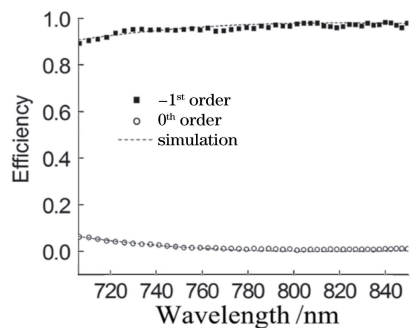


图3 TE模 $50^\circ$ 入射-1级衍射和0级反射效率光谱<sup>[23]</sup>  
Fig. 3 Experimentally measured spectra of  $-1^{\text{st}}$  order diffraction efficiency and  $0^{\text{th}}$  order reflection efficiency of TE polarization with  $50^\circ$  incident angle<sup>[23]</sup>

2009年,Palmier等<sup>[21]</sup>实验对比了用于制作PCG的两种高反射镜(MMLD和MLD)的反射和激光损伤性能。利用金层代替4对介质膜层,通过电子束蒸发镀制,其反射曲线如图4所示,两种结构在1053 nm附近均保持较高且平坦的反射率,尤其是MMLD的宽带反射率,进一步证明了MMLD在



表1 MMDG、MDG和MMLD的LIDT、入射角度和周期<sup>[24]</sup>

Table 1 LIDT, incident angle, and grating period of MMDG, MDG, and MMLD<sup>[24]</sup>

Item	Damage threshold / ( $J \cdot cm^{-2}$ )	Diffraction angle / ( $^{\circ}$ )	Groove spacing / nm
Mixed grating	$1.1 \pm 0.1$	50	560
Dielectric grating	$1.1 \pm 0.1$	57	580
Dielectric multilayer	$1.6 \pm 0.2$	57	—

PCG中对带宽拓宽的有效性。激光损伤测试结果表明,两种结构的LIDT均在 $5 J/cm^2$ 左右,金属层的加入并没有降低整个结构的LIDT。Neauport等<sup>[22,25]</sup>进行了完整的MMDG设计、制作和LIDT的研究测试,以高衍射效率和高LIDT为设计目标,对光栅表面的浮雕结构参数进行优化,设计出的光栅为梯形结构而非矩形结构。利用电子束蒸发镀膜方法制作光栅,用原子力显微镜测试光栅槽形结构,并对衍射效率和电场分布进行测量,结果显示,1053 nm波长TE模式入射光的-1级衍射效率可以达到96%,但该研究未提及其高衍射效率工作带宽。测试结果表明,MMDG的LIDT与MDG基本一致,在 $3 J/cm^2$ 左右。

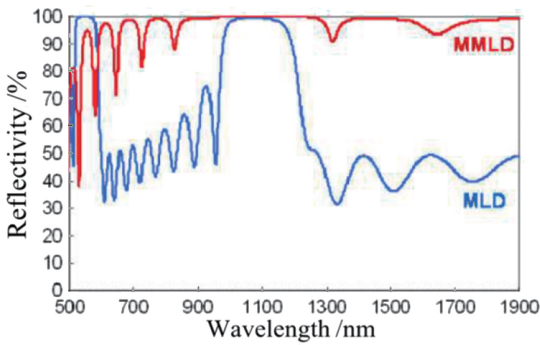


图4 TE模 $70.6^{\circ}$ 入射时MLD和MMLD反射率<sup>[21]</sup>

Fig. 4 Reflectivity of MLD and MMLD measured for TE polarization with  $70.6^{\circ}$  incident angle<sup>[21]</sup>

在MMDG研究领域,国内起步较晚,但是在较短的时间内取得了较多的研究成果。孔伟金课题组<sup>[26-34]</sup>一直致力于MMDG的新型结构设计和性能优化分析工作。首先,利用银金属层和两种折射率的电介质材料分别设计了以800 nm和1053 nm为中心,在超过300 nm带宽内反射率优于99%的MMLD;然后,设置衍射效率和工作带宽为数值评价函数,对光栅结构(槽深、剩余厚度、占宽比、入射角)进行优化,用于800 nm中心波长的光栅结构的最优参数为(240 nm,10 nm,0.26,53°),该光栅在超

过130 nm的光谱范围内的衍射效率可达到97%。1053 nm中心波长的光栅结构参数为(320 nm,10 nm,0.26,56°),可以在超过154 nm的波长范围内提供优于97%的衍射效率<sup>[26]</sup>。随后,利用银金属层和3种折射率的电介质材料设计了以1053 nm为中心,在超过400 nm带宽内优于99%反射率的MMLD,然后设置衍射效率和工作带宽为数值评价函数对光栅结构进行优化,最后得到的光栅结构的最优参数为(290 nm,10 nm,0.28,60°),可以在951~1146 nm的波长范围内提供优于97%的衍射效率,工作带宽达到195 nm(图5)<sup>[27]</sup>。利用银金属层和3种折射率的电介质材料设计以800 nm为中心波长的MMDG,其光栅结构的最优参数为(272 nm,10 nm,0.23,54°),可以提供优于97%的衍射效率,工作带宽达到150 nm(图6)<sup>[28]</sup>。为了进一步减少介质膜的层数,设计了只使用一对高、低折射率电介质材料的MMLD(MMLD的结构减少为三层,这对于MMDG的制作来说尤为重要),其以800 nm为中心波长、衍射效率优于97%的工作带宽超过120 nm<sup>[29]</sup>,而以1053 nm为中心波长的工作带宽超过160 nm<sup>[30]</sup>。以上所设计的MMDG均表现出了优良的性能和极好的制作工艺容差,这为光栅的制作提供了理论指导,但是并没有给出相应的制作工艺和产品。

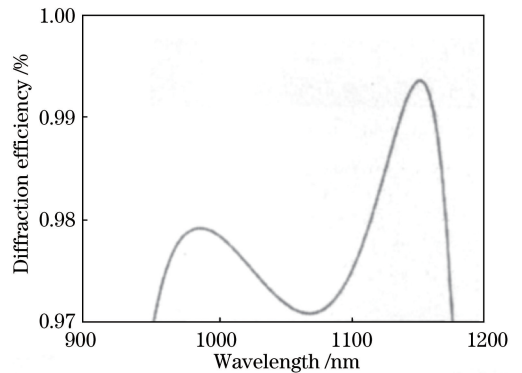


图5 MMDG的宽带衍射光谱<sup>[27]</sup>

Fig. 5 Broadband diffraction efficiency spectrum of MMDG<sup>[27]</sup>

中国科学院上海光学精密机械研究所一直致力于高性能PCG的设计和制作研究,前期主要集中于MDG设计优化和制作工艺研究。2010年,Wang等<sup>[35]</sup>报道了一款用于800 nm波长、在100 nm带宽内TE波衍射效率高于97.5%的MDG,和两款用于1053 nm波长、在200 nm带宽内衍射效率超过97%的MMDG。MMDG只需要一个金属层、一个低折射率匹配层和刻蚀光栅的高折射率层,整个光

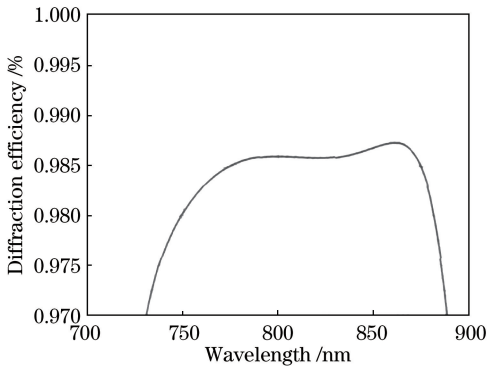


图 6 MMDG 的宽带衍射光谱<sup>[28]</sup>

Fig. 6 Broadband diffraction efficiency of MMDG<sup>[28]</sup>

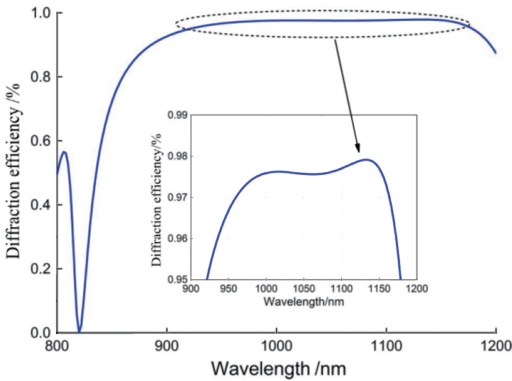


图 7 MMDG 的超宽带衍射光谱, MMDG 参数为 (315 nm, 173 nm, 140 nm, 0.25)<sup>[35]</sup>

Fig. 7 Ultrabroad diffraction efficiency of MMDG. MMDG parameters are 315 nm, 173 nm, 140 nm, and 0.25<sup>[35]</sup>

栅的膜层数降到了最低,这有利于光栅的工艺制作。其衍射光谱曲线如图 7 所示。在前期的 MMDG 研究中,所设计的 MMDG 均是针对单一的 TE 或横磁(TM)模式入射光具有良好的衍射效率。2012 年, Hu 等<sup>[36]</sup>报道了一种偏振无关的 MMDG,以 800 nm 为中心波长,TE 和 TM 模入射光的衍射效率优于 90% 时对应的工作带宽可以达到 120 nm,其衍射光谱曲线如图 8 所示。该 MMDG 在激光系统和光谱仪等应用系统中具有较强的应用潜力。2014 年, Guan 等<sup>[37]</sup>首先利用遗传算法和 Fourier 模式方法设计了几种以 800 nm 为中心波长的 MMDG,并对其衍射效率、带宽和电场分布进行了详细的分析,着重分析了单层匹配层和多层匹配层对整个光栅性能的影响。单层介质匹配层的 MMDG 在 140 nm 带宽内的衍射效率可以达到 93% 以上,金属层有最小的光场强度,同时最大的光场强度分布在光栅的周期结构中。MMDG 导致 LIDT 低的最主要原因是光栅结构和匹配层的脱落,该设计可以有效提高光栅的 LIDT。同时,当匹配

层的厚度发生变化时,光栅结构、匹配层和金属层中的电场强度增大,而衍射效率减小,因此可以通过优化匹配层厚度来获得最高的衍射效率和最小的电场强度。另外,该研究还指出,在选择匹配层折射率时要避免导模共振现象的发生,以便提高光栅的工作带宽。对于多层介质匹配层的 MMDG,其匹配层由多层高、低折射率介质材料交替组成,计算表明,随着高、低折射率介质膜层的增多,高衍射效率带宽减少,但金属层中的电场强度也有效减小,因此需要在最大带宽和最小电场强度中找到平衡,其变化规律如图 9 所示。

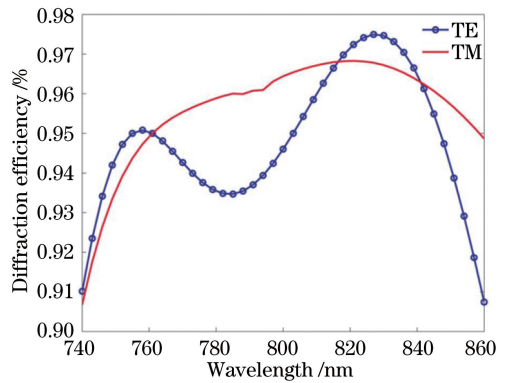


图 8 TE 和 TM 偏振的 -1 级衍射光谱<sup>[36]</sup>

Fig. 8 Diffraction efficiencies of the -1<sup>st</sup> order for both TE and TM polarizations<sup>[36]</sup>

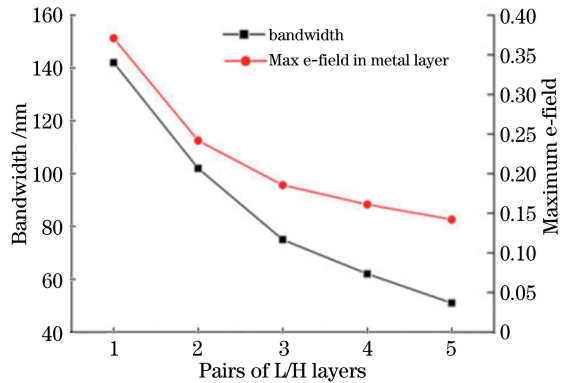


图 9 带宽和银层中最大电场的关系<sup>[37]</sup>

Fig. 9 Relationship between bandwidth and maximum electric field in Ag layer<sup>[37]</sup>

之后, MMDG 的研究方向主要集中在其制作工艺的研究和改善。2014 年, Guan 等<sup>[38]</sup>指出, HfO<sub>2</sub> 材料的光栅结构可以表现出较好的工作带宽,但在光栅的刻蚀过程中存在一定的困难。SiO<sub>2</sub> 材料的光栅结构获得宽带宽时需要较大的槽深和线密度,但是具有 LIDT 较高和容易制作的优点。结合两种材料的优势,设计了一种全新结构的 MMDG,其结构如图 10 所示,梯形光栅结构由两层 SiO<sub>2</sub> 夹一层

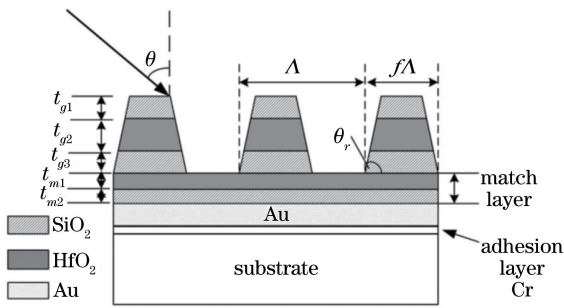


图 10 文献[38]中的 MMDG 结构

Fig. 10 Structure of MMDG proposed in Ref. [38]

HfO<sub>2</sub>构成。通过优化设计,其衍射效率优于 90% 的带宽可以达到 200 nm,优于 95% 的带宽达到 137 nm。最后,制作了 50 mm×50 mm 的光栅,测试结果表明,其实际衍射效率与计算衍射效率吻合较好,证明所设计的光栅具有良好的工艺容差。利用 800 nm 波长 45 fs 脉宽激光测试可得其 LIDT 为 0.32 J/cm<sup>2</sup>。尽管该光栅的衍射效率和带宽在已有报道中并不是最优的,但制作出的光栅与设计吻合良好,为光栅的实用化和制作工艺打下了基础。2014 年,吴建波等<sup>[39]</sup>研究了退火温度对 MMDG 中 MMLD 的影响,发现退火对膜层表面粗糙度的影响较小,但是反射率会下降,且退火温度越高反射率下降越大。高退火温度可以提高化学清洗剂的耐受力,因此可以选择 250 °C 退火 10 h 作为最佳工艺参数。在此条件下,可以在保持反射率下降较小的前提下提高化学清洗耐受力。张洪等<sup>[40]</sup>认为,高温退火处理可以增强 MMLD 抗化学清洗能力的原因在于 Au 层和 SiO<sub>2</sub>层之间形成了过渡层,增强了黏附力,阻挡了酸溶液的浸入。

Chen 等<sup>[41-43]</sup>对 MMDG 的制作工艺进行了深入研究,通过对光刻胶掩模参数的修正、刻蚀过程中槽形的演变规律、不同材料的刻蚀速率、刻蚀过程的监控、光栅的清洗等方面的研究和探索,制作出了衍射效率高于 90% 的带宽为 169 nm 的 MMDG,带宽内的平均衍射效率达到 93.7%,峰值效率为 95.1%,LIDT 为 0.32 J/cm<sup>2</sup><sup>[38]</sup>。这是首篇公开的有关 MMDG 制作工艺的详细完整报道,为 MMDG 的制作提供了工艺指导。

Zou 等<sup>[49-50]</sup>研究了结状缺陷对损伤阈值的影响。研究发现,在完整的光栅中损伤在光栅脊处开始出现,但当有结状缺陷存在时,损伤会由结状缺陷处开始。理论分析了损伤的过程,以及损伤程度与结状缺陷尺寸之间的关系,并对其损伤阈值进行预测。研究表明,结状缺陷位置会导致电场强度增强,

从而使其更容易损伤。

MMDG 除了作为 PCG 使用外,一些新的应用领域也得到了开发。例如,2013 年,You 等<sup>[51]</sup>和 Guan 等<sup>[52]</sup>将 MMDG 用作偏振分束器,表现出了良好的偏振分束性能;2017 年以来,李娜等<sup>[53-54]</sup>优化设计了 MMDG,将其用作消色差相位延迟器,在 900~1200 nm 的光谱范围内,其相位延迟均可以保持在 4°以内。

## 4 展 望

MMDG 结合了金属膜的宽带反射特性和 MDG 的高衍射效率和高 LIDT 的特性,表现出了高衍射效率、高 LIDT 和超宽工作带宽,通过精心设计,可以使其保持较好的光束质量,在 CPA 中有较强的应用前景。

目前,为了使 MMDG 走向实用化,并获得更优良的光学性能,主要还有以下两个方面的工作需要进一步深入研究:1) MMDG 的设计与制作匹配性。目前报道所设计的光栅结构基本都是矩形的,但在实际光栅刻蚀过程中很难做到矩形刻蚀,基本都是梯形,这对光栅的性能会有较大的影响。同时,光栅的占宽比过小、槽深过大,会导致光栅非常容易损坏,因此需要根据光栅的制作工艺不断优化光栅的参数设计,使其更有利于光栅的制作和应用。2) LIDT 的进一步提高。激光的能量仍在不断提高,因此进一步提高 MMDG 的 LIDT 是一项重要的研究工作。通过对光栅内部的电场分布进行研究,可以在一定程度上提高 LIDT。同时,用于提高 MDG 的 LIDT 的后处理、清洗等技术在 MMDG 的制作中也有一定的参考价值<sup>[10-18]</sup>。

## 参 考 文 献

- [1] Strickland D, Mourou G. Compression of amplified chirped optical pulses[J]. Optics Communications, 1985, 56(3): 219-221.
- [2] Perry M D, Mourou G. Terawatt to petawatt subpicosecond lasers[J]. Science, 1994, 264(5161): 917-924.
- [3] Boyd R D, Britten J A, Decker D E, et al. High-efficiency metallic diffraction gratings for laser applications[J]. Applied Optics, 1995, 34(10): 1697-1706.
- [4] Wang L L, Kong F Y, Xia Z L, et al. Evaluation of femtosecond laser damage to gold pulse compression gratings fabricated by magnetron sputtering and e-

- beam evaporation [J]. *Applied Optics*, 2017, 56 (11): 3087-3095.
- [5] Huang H P, Kong F Y, Xia Z L, et al. Ultrashort pulses-driven dynamics of blisters in Au-coated gratings[J]. *Optical Materials*, 2017, 72: 130-135.
- [6] Perry M D, Boyd R D, Britten J A, et al. High-efficiency multilayer dielectric diffraction gratings[J]. *Optics Letters*, 1995, 20(8): 940-942.
- [7] Li L F, Hirsh J. All-dielectric high-efficiency reflection gratings made with multilayer thin-film coatings[J]. *Optics Letters*, 1995, 20(11): 1349-1351.
- [8] Liu S J, Shen Z C, Kong W J, et al. Optimization of near-field optical field of multi-layer dielectric gratings for pulse compressor [J]. *Optics Communications*, 2006, 267(1): 50-57.
- [9] Kong W J, Liu S J, Shen J, et al. Design of multilayer dielectric grating for femtosecond laser [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, 55(3): 1143-1147.  
孔伟金, 刘世杰, 沈健, 等. 飞秒激光用多层介质膜脉宽压缩光栅的设计[J]. *物理学报*, 2006, 55(3): 1143-1147.
- [10] Chen S B, Sheng B, Qiu K Q, et al. Cleaning method for improving laser induced damage threshold of multilayer dielectric pulse compressor gratings[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24 (11): 2631-2636.  
陈上碧, 盛斌, 邱克强, 等. 提高多层介质膜脉宽压缩光栅阈值的清洗方法[J]. *强激光与粒子束*, 2012, 24(11): 2631-2636.
- [11] Ge X L, Teng H, Zheng Y, et al. Plasma cleaning of compressed grating in chirped-pulse femtosecond laser amplifier[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(4): 0402006.  
葛绪雷, 滕浩, 郑轶, 等. 飞秒激光啁啾脉冲放大中压缩光栅的等离子体清洗[J]. *中国激光*, 2012, 39 (4): 0402006.
- [12] Howard H P, Aiello A F, Dressler J G, et al. Improving the performance of high-laser-damage-threshold, multilayer dielectric pulse-compression gratings through low-temperature chemical cleaning [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(8): 1682-1692.
- [13] Xu X D, Liu Y, Qiu K Q, et al. Ion beam etching for multilayer dielectric pulse compressor gratings with top layers of  $\text{HfO}_2$  [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(23): 234202.  
徐向东, 刘颖, 邱克强, 等.  $\text{HfO}_2$  顶层多层介质膜脉宽压缩光栅的离子束刻蚀[J]. *物理学报*, 2013, 62 (23): 234202.
- [14] Guan H Y, Jin Y X, Liu S J, et al. Broadband trapeziform multilayer dielectric grating for femtosecond pulse compressor: design, fabrication, and analysis [J]. *Laser Physics*, 2013, 23 (11): 115301.
- [15] Shen B Y, Zeng L J, Li L F, et al. Fabrication of polarization independent gratings made on multilayer dielectric thin film substrates[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27(11): 111013.  
申碧瑶, 曾理江, 李立峰, 等. 多层介质膜偏振无关光栅的研制[J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27(11): 111013.
- [16] Qiu Z F, Wang M H, Pu Y T, et al. Investigation progress of laser damage properties on multilayer dielectric film pulse compression grating[J]. *Journal of Materials Science and Engineering*, 2017, 35(2): 329-338.  
邱志方, 王敏辉, 蒲云体, 等. 多层介质膜脉冲压缩光栅激光损伤特性研究进展[J]. *材料科学与工程学报*, 2017, 35(2): 329-338.
- [17] Gracewski S M, Boylan S, Lambropoulos J C, et al. Simulation of internal stress waves generated by laser-induced damage in multilayer dielectric gratings [J]. *Optics Express*, 2018, 26(14): 18412-18422.
- [18] Hao Y F, Sun M Y, Guo Y J, et al. Asymmetrical damage growth of multilayer dielectric gratings induced by picosecond laser pulses [J]. *Optics Express*, 2018, 26(7): 8791-8804.
- [19] Bonod N, Néauport J. Optical performance and laser induced damage threshold improvement of diffraction gratings used as compressors in ultra high intensity lasers[J]. *Optics Communications*, 2006, 260(2): 649-655.
- [20] Néauport J, Bonod N. Pulse compression gratings for the PETAL project: a review of various technologies [J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 7132: 71320D.
- [21] Palmier S, Neauport J, Baclet N, et al. High reflection mirrors for pulse compression gratings[J]. *Optics Express*, 2009, 17(22): 20430-20439.
- [22] Neauport J, Bonod N, Hocquet S, et al. Mixed metal dielectric gratings for pulse compression [J]. *Optics Express*, 2010, 18(23): 23776-23783.
- [23] Flury M, Tonchev S, Fechner R, et al. High-efficiency wide-band metal-dielectric resonant grating for 20 fs pulse compression [J]. *Journal of the European Optical Society: Rapid Publications*, 2007, 2: 07024.



- [24] Canova F, Uteza O, Chambaret J P, et al. High-efficiency, broad band, high-damage threshold high-index gratings for femtosecond pulse compression [J]. *Optics Express*, 2007, 15(23): 15324-15334.
- [25] Neauport J, Lavastre E, Razé G, et al. Effect of electric field on laser induced damage threshold of multilayer dielectric gratings [J]. *Optics Express*, 2007, 15(19): 12508-12522.
- [26] Kong W J, Wang S H, Wei S J, et al. Diffraction property of broadband metal multi-layer dielectric gratings based on rigorous coupled-wave analysis [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(11): 114214.  
孔伟金, 王书浩, 魏世杰, 等. 基于严格耦合波理论的宽光谱金属介质膜光栅衍射特性分析 [J]. *物理学报*, 2011, 60(11): 114214.
- [27] Kong W J, Wang S H, Yun M J, et al. Optimization and tolerance of ultra-broadband metal multi-layer dielectric gratings for femtosecond lasers [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2011, 22 (12): 1769-1773.  
孔伟金, 王书浩, 云茂金, 等. 飞秒激光用超宽带金属介质膜光栅的优化设计和工艺容差分析 [J]. *光电子 • 激光*, 2011, 22(12): 1769-1773.
- [28] Kong W J, Wang S H, Wei S J, et al. Design and diffraction property of broad waveband high-diffraction-efficiency grating for chirped pulse compressor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(10): 1005001.  
孔伟金, 王书浩, 魏世杰, 等. 宽光谱高衍射效率脉宽压缩光栅设计和性能分析 [J]. *光学学报*, 2011, 31(10): 1005001.
- [29] Kong W J, Zhang W F, Yun M J, et al. Broadband and high efficiency metal-multilayer dielectric grating based on non-quarter wave coatings as reflective mirror for 800 nm [J]. *Journal of Modern Optics*, 2012, 59(19): 1680-1685.
- [30] Zhang W F, Kong W J, Yun M J, et al. Broadband and high efficiency metal multi-layer dielectric grating based on non-quarter-wave coatings as a reflective mirror [J]. *Chinese Physics B*, 2012, 21 (9): 094218.
- [31] Kong W J, Wang S H, Zhang W F, et al. Diffraction performance of metal-dielectric grating [J]. *Journal of Qingdao University(Natural Science Edition)*, 2011, 24(3): 23-25.  
孔伟金, 王书浩, 张文飞, 等. 金属介质膜光栅衍射特性研究 [J]. *青岛大学学报(自然科学版)*, 2011, 24(3): 23-25.
- [32] Wang S H, Kong W J, Yun M J, et al. Broadband and high-efficiency metal-multilayer dielectric grating centered at 800 nm based on non-quarter wave coatings as reflective mirror [J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8786: 878627.
- [33] Zhang W F, Kong W J, Yun M J, et al. Design and analysis of high efficiency metal-multi-layer dielectric grating [J]. *Journal of Qingdao University(Natural Science Edition)*, 2010, 23(4): 41-45.  
张文飞, 孔伟金, 云茂金, 等. 高衍射效率金属介质膜光栅的设计及性能分析 [J]. *青岛大学学报(自然科学版)*, 2010, 23(4): 41-45.
- [34] Zhang W F. Research of broadband and high efficiency metal multilayer dielectric grating [D]. Qingdao: Qingdao University, 2012.  
张文飞. 宽光谱高衍射效率金属/介质膜光栅衍射特性研究 [D]. 青岛: 青岛大学, 2012.
- [35] Wang J P, Jin Y X, Ma J Y, et al. Design and analysis of broadband high-efficiency pulse compression gratings [J]. *Applied Optics*, 2010, 49 (16): 2969-2978.
- [36] Hu A D, Zhou C H, Cao H C, et al. Polarization-independent wideband mixed metal dielectric reflective gratings [J]. *Applied Optics*, 2012, 51 (20): 4902-4906.
- [37] Guan H Y, Jin Y X, Liu S J, et al. Near-field optical properties of wide bandwidth metal multi-layer dielectric gratings for pulse compressor [J]. *Applied Physics B*, 2014, 114(4): 557-565.
- [38] Guan H Y, Chen H, Wu J B, et al. High-efficiency, broad-bandwidth metal/multilayer-dielectric gratings [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(1): 170-173.
- [39] Wu J B, Jin Y X, Guan H Y, et al. Effect of annealing temperature on metal/dielectric multilayers for fabricating broadband pulse compression gratings [J]. *Journal of Inorganic Materials*, 2014, 29(10): 1087-1092.  
吴建波, 晋云霞, 关贺元, 等. 退火温度对宽带脉冲压缩光栅载体金属/介质多层高反膜的影响 [J]. *无机材料学报*, 2014, 29(10): 1087-1092.
- [40] Zhang H, Jin Y X, Kong F Y, et al. Influence of annealing on interface diffusion and anti-chemical-cleaning property of metal-dielectric multilayer films [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43 (10): 1003002.  
张洪, 晋云霞, 孔钊宇, 等. 退火对金属介质多层膜的界面扩散及抗化学清洗性能的影响 [J]. *中国激光*, 2016, 43(10): 1003002.



- [41] Chen H, Guan H Y, Zeng L J, et al. Fabrication of broadband, high-efficiency, metal-multilayer-dielectric gratings [J]. Optics Communications, 2014, 329: 103-108.
- [42] Chen H. Broadband, high-efficiency gratings for laser pulse compression: metal-multilayer dielectric gratings and metal-multilayer-dielectric coated gratings[D]. Beijing: Tsinghua University, 2015.  
陈会. 宽带脉冲压缩光栅研制: 金属-介质膜光栅与后镀膜光栅[D]. 北京: 清华大学, 2015.
- [43] Chen H. Metal/multilayer-dielectric coated grating for chirped pulse amplification laser system [J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9271: 92711C.
- [44] Jin Y X, Yi K, Shao J D. Progress in reflective diffraction gratings used in high power laser system[C]//Advanced Solid State Lasers, October 4-9, 2015, Berlin, Germany. Washington, D. C.: OSA, 2015: ATu2A.30.
- [45] The Nobel prize in physics 2018[EB/OL]. <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2018/summary/>.
- [46] Moharam M G, Gaylord T K, Magnusson R. Bragg diffraction of finite beams by thick gratings [J]. Journal of the Optical Society of America, 1980, 70 (3): 300-304.
- [47] Moharam M G, Gaylord T K. Rigorous coupled-wave analysis of planar-grating diffraction [J]. Journal of the Optical Society of America, 1981, 71 (7): 811-818.
- [48] Moharam M G, Gaylord T K. Coupled-wave analysis of reflection gratings [J]. Applied Optics, 1981, 20 (2): 240-244.
- [49] Zou X, Kong F Y, Jin Y X, et al. Influence of nodular defect size on metal dielectric mixed gratings for ultra-short ultra-high intensity laser system [J]. Optical Materials, 2019, 91: 177-182.
- [50] Xu J, Zou X, Chen J M, et al. Metal dielectric gratings with high femtosecond laser damage threshold of twice as much as that of traditional gold gratings [J]. Optics Letters, 2019, 44 (11): 2871-2874.
- [51] You C L, Kong W J, Cao K H, et al. Optimization design and analysis of reflecting polarizing beam splitter based on metal-multilayer dielectric grating for 800 nm [J]. Journal of Modern Optics, 2013, 60 (19): 1598-1602.
- [52] Guan H Y, Jin Y X, Liu S J, et al. Optimization design of polarizing beam splitter based on metal-multilayer dielectric reflecting grating [J]. Optics Communications, 2013, 287: 25-30.
- [53] Li N, Kong W J, Xia F, et al. Broadband achromatic phase retarder based on metal-multilayer dielectric grating [J]. Chinese Physics B, 2018, 27 (5): 054202.
- [54] Li N, Kong W J, Ji S Y, et al. Broadband achromatic phase retarder based on subwavelength metal dielectric gratings [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(2): 0205001.  
李娜, 孔伟金, 季淑英, 等. 基于亚波长金属介质膜光栅的宽光谱消色差相位延迟器 [J]. 光学学报, 2017, 37(2): 0205001.