

宽光谱高衍射效率脉宽压缩光栅设计和性能分析

孔伟金 王书浩 魏世杰 云茂金 张文飞

(青岛大学物理科学学院, 山东 青岛 266071)

摘要 基于飞秒激光对脉宽压缩光栅宽光谱和高衍射效率的要求,提出了一种金属介质膜结构的宽光谱高衍射效率脉宽压缩光栅,该光栅由基底、金属介质膜和表面浮雕结构组成。为获得宽光谱高衍射效率的脉宽压缩光栅,采用严格耦合波理论对金属介质膜光栅的结构参数进行优化设计。数值分析表明当金属介质光栅的槽深、剩余厚度、占空比和入射角分别为 272 nm, 10 nm, 0.23 和 54° 时,对于中心波长为 800 nm 的 TE 波,其-1 级衍射效率在 732~886 nm 内优于 97%,有效工作带宽达 150 nm。

关键词 衍射;宽光谱;严格耦合波理论;金属介质膜光栅

中图分类号 O484.4⁺1 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201131.1005001

Design and Diffraction Property of Broad Waveband High-Diffraction-Efficiency Grating for Chirped Pulse Compressor

Kong Weijin Wang Shuhao Wei Shijie Yun Maojin Zhang Wenfei

(College of Physics Science, Qingdao University, Qingdao, Shandong 266071, China)

Abstract The grating used for chirped pulse compressor should have broad waveband and high diffraction efficiency. A metal-multilayer-dielectric grating (MMDG) with broad waveband and high diffraction efficiency is proposed to stretch and compress chirped pulse. It consists of three parts as substrate, metal and multi-layer dielectric mirror and surface relief structure. Rigorous coupled-wave analysis is employed to analyze the diffraction property of MMDG to extend working waveband and improve the diffraction efficiency. Simulation results show that when the groove depth, residual thickness, duty cycle and incident angle are 272 nm, 10 nm, 0.23 and 54° respectively, the average diffraction efficiency is higher than 97% for TE polarized light over the 150 nm bandwidth centered at 800 nm as the wavelength changes from 732 to 886 nm.

Key words diffraction; broad waveband; rigorous coupled-wave theory; metal-multilayer dielectric grating

OCIS codes 050.1950; 050.2770; 050.6624; 310.6628

1 引言

超短超强激光脉冲啁啾脉冲放大(CPA)技术的性能主要取决于脉宽压缩光栅^[1,2],作为 CPA 系统中核心元件的衍射光栅必须具有尽可能高的衍射效率和抗激光损伤阈值^[3,4]。设计和制备高衍射效率、高损伤阈值和宽光谱的脉宽压缩光栅一直是 CPA 技术的重要研究方向。镀金光栅虽然工作带宽相对较宽,但由于具有较强的吸收特性很难获得高衍射效率和抗激光损伤阈值^[5]。多层介质膜光栅(MDG)具有高衍射效率和高抗激光损伤阈值等优点^[6],但是由于多层介质膜的干涉作用,其工作带宽仅局限于几十纳米范围,远远不能满足飞秒激光对

脉宽压缩光栅宽光谱的要求^[7]。为了扩展光栅的工作带宽和衍射效率,金属介质膜光栅(MMDG)成为主要的研究方向。MMDG 充分结合了金属的宽光谱和介质膜光栅的高衍射效率特性,近年来成为设计和制备宽光谱高衍射效率脉宽压缩光栅的主要方式^[8~11]。Palmier 等^[8]详细对比了 MMDG 反射镜与全介质光栅反射镜的性能,其中金属介质膜反射镜的反射带宽可以达到 400 nm,该反射镜为设计宽光谱的 MMDG 提供了带宽基础。Neauport 等^[9]以 Au-(SiO₂/HfO₂)⁴-SiO₂ 为金属介质膜结构,设计了 1053 nm, 200 fs 激光器用脉宽压缩光栅,其抗激光损伤阈值接近 3 J/cm²。Canova 等^[10]以 Au-Al₂O₃-

收稿日期: 2011-04-18; 收到修改稿日期: 2011-05-26

基金项目: 国家自然科学基金(10804060, 10904080)资助课题。

作者简介: 孔伟金(1976—)男,博士,副教授,主要从事衍射光学和薄膜光学等方面的研究。E-mail: kwjsd@163.com

HfO₂ 为基础结构设计了 800 nm, 50 fs 激光用脉宽压缩光栅, 衍射效率优于 97% 的带宽为 120 nm。Wang 等^[11]设计的 MMDG 97% 以上衍射效率的带宽超过 100 nm。

本文基于 MMDG 结构形式, 采用严格耦合波理论, 对光栅的槽深、占空比和周期等参数进行优化, 设计了使用波长为 800 nm 的 MMDG, 其 -1 级衍射效率 97% 以上的带宽达到 150 nm, 并讨论了所设计的宽光谱高衍射效率 MMDG 的工艺容差。本文的研究工作对设计和制备宽光谱、高衍射效率的 MMDG 具有一定的指导意义。

2 优化设计理论

MMDG 的结构如图 1 所示, 其中 Λ 为光栅周期, f 为占空比, t_g 为光栅槽深, t_r 为顶层薄膜刻蚀光栅所剩余的厚度, HR 是由金属和介质组成的高反射膜层, 金属层加在基底和底层介质膜之间, 在分析中通常将浮雕结构和介质膜系合称为“光栅区”^[11~13], 进而将光栅区作为一个整体处理。基于金属层与介质膜层多方面的相似性, 在数值分析中, 一般将金属作为一层对电磁波有吸收作用的“介质膜”来处理。

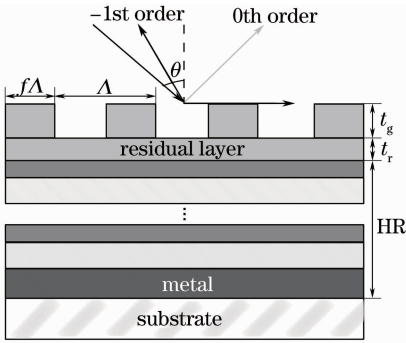


图 1 MMDG 结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of MMDG structure

设计目标是对于 800 nm 的 TE 波, 其 -1 级衍射效率优于 97% 的带宽达到 150 nm。选定光栅的周期为 550 nm, 在光栅的设计过程中, 通常将浮雕结构和介质膜系分开设计。

2.1 金属介质反射膜的设计

为达到设计目标, 反射镜需要在中心波长 800 nm 附近较宽的区域内提供 99% 以上的反射率。据此标准来设计反射镜, 给定反射镜的初始膜系为 Ag (LHT)², 其中 L, H 和 T 分别代表厚度为四分之一波长的 HfO₂ ($n_H = 1.96$), SiO₂ ($n_L = 1.46$) 和 TiO₂ ($n_T = 2.3$)^[14]。底层的金属选用 Ag, 其介电常数为 $\epsilon_m =$

-28-1.5j。

2.2 MMDG 的结构优化

介质膜系主要用来提供较高的反射率, 浮雕结构用来调制光的衍射。-1 级衍射效率取决于光栅的表面浮雕结构, 定义 MMDG 各参数的表示方法为 $\{t_g, t_r, f, \theta\}$, 其中 θ 为入射角。对应槽深、剩余厚度和周期的单位为纳米 (nm)。用 $\{\Delta t_g, \Delta t_r, \Delta f, \Delta \theta\}$ 表示各数值的变化间隔。定义评价函数为

$$\begin{cases} M_b = N\Delta\lambda \\ M_w = \left[\frac{1}{N} \sum_i (\lambda_i - \lambda_c)^2 \right]^{1/2}, \end{cases} \quad (1)$$

式中 λ_i 代表在一个连续变化的波长区间内, 衍射效率大于 97% 的第 i 个波长, N 为 λ_i 的个数, $\Delta\lambda$ 为波长间隔, λ_c 为中心波长 800 nm。在上述评价函数中, M_b 描述衍射效率优于 97% 以上的可用光谱宽度, λ_i 的均方根 M_w 描述衍射光谱对中心波长的偏离程度。参数的变化范围是 $\{10, 10, 0.20, 39^\circ\}$ 至 $\{450, 300, 0.50, 65^\circ\}$, 变化间隔为 $\{10, 10, 0.01, 1^\circ\}$ 。采用对光栅衍射特性进行矢量分析的严格耦合波理论^[15~17], 数值分析优化后的结构参数为 $\{270, 10, 0.23, 54^\circ\}$ 。图 2 中的等高线给出了此光栅 -1 级衍射效率达到 97% 以上的带宽随槽深和占空比的变化关系。

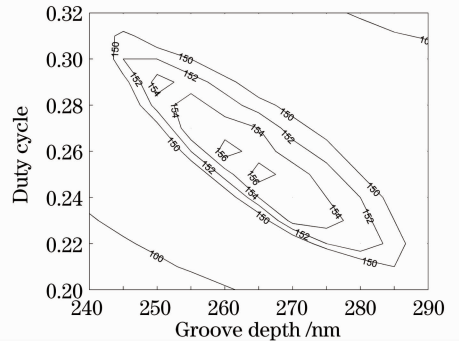


图 2 MMDG 带宽随槽深和占空比变化

Fig. 2 Bandwidth as a function of groove depth and duty cycle

由图 2 中带宽随槽深和占空比的变化关系可以进一步确定获得 -1 级衍射效率达到 97% 以上时, 所对应的最优化结构参数为 $\{272, 10, 0.23, 54^\circ\}$, 该参数所对应的 -1 级衍射效率光谱曲线如图 3 所示。

由图 3 可见在 732~886 nm 内衍射效率优于 97%。由光栅方程可知, 当 $\sin \theta$ 小于 $\lambda_i / (2\Lambda)$ 时, -1 级衍射角小于入射角, 才能够将衍射光线取出。所以在 θ 和 Λ 恒定的条件下, 不满足上述关系的波

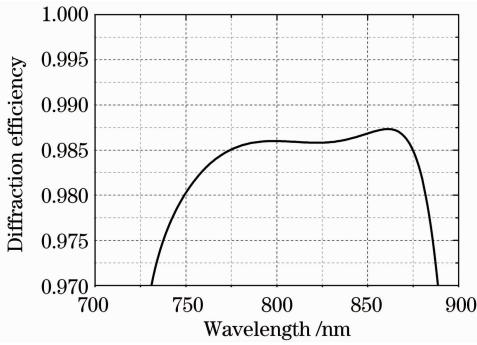


图3 优化设计的MMDG宽频衍射效率光谱曲线
Fig. 3 Broadband diffraction efficiency spectrum of optimized MMDG

长应当舍去,这样所得波长范围才是可用的,否则衍射光会与入射光线重合。本设计中波长732~886 nm所对应的-1级衍射角为 41.68° ~ 53.7° ,最

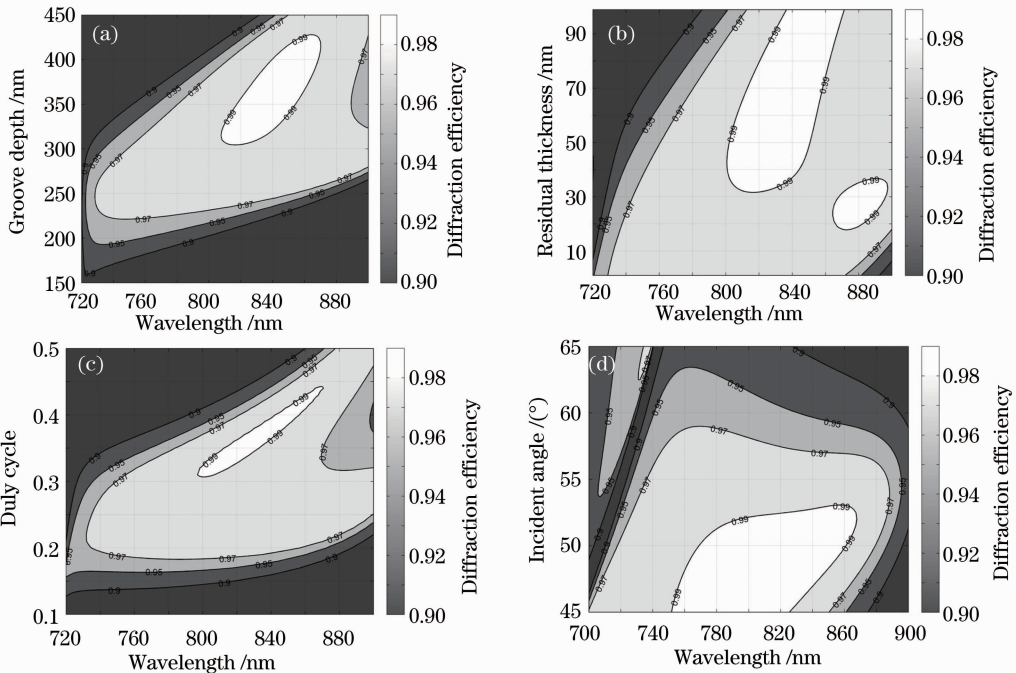


图4 MMDG工艺容差分析

Fig. 4 Fabrication tolerance analysis of MMDG

图4(c)表明当MMDG的占空比在0.2~0.35时,其-1级衍射效率优于97%的区域范围比较大,受占空比的影响较小;图4(d)表明当入射角在 45° ~ 54° 的范围变化时,在比较大的范围内其-1级衍射效率保持在97%以上。由此可见所设计的MMDG的结构具有较大的工艺容差,满足光栅制备的工艺要求。

4 结论

基于金属介质膜结构和严格耦合波理论,对光

大的-1级衍射角偏离入射角 54° ,其工作带宽达到150 nm。

3 工艺容差分析

MMDG的槽深、剩余厚度和占空比在制备过程中会存在一定的误差,对光栅的衍射效率产生影响。另外使用时入射角也会影响衍射效率的分布。图4为-1级衍射效率随光栅槽深、剩余厚度、占空比和入射角变化的等高图。由图4(a)可见当固定光栅的其他结构参数,槽深在240~450 nm之间变化时,其-1级衍射效率均优于97%。当槽深在300~410 nm范围内变化时,其-1级衍射效率均优于99%。图4(b)表明剩余厚度的变化对-1级衍射效率的影响比较小,因此-1级97%以上衍射效率对槽深和剩余厚度的工艺容差相对较大。

栅表面浮雕结构参数进行优化设计,当金属介质光栅的槽深、剩余厚度、占空比和入射角分别为272 nm,10 nm,0.23和 54° 时,在732~886 nm内其-1级衍射效率优于97%,带宽达到150 nm。

参考文献

- 1 Qu Kenan, Zhang Weigang, Liu Zhuolin *et al.*. Dispersion compression in ultra-short optical pulse compressing system and transmitting system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(2): 449~453
- 屈柯楠, 张伟刚, 刘卓琳等. 超短脉冲压缩系统和传输系统的色散补偿[J]. *中国激光*, 2010, **37**(2): 449~453

- 2 Guo Ailin, Yang Qingwei, Sun Fuling *et al.*. Spectrum shaping of chirped pulse [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29** (6): 1582~1585
郭爱林, 杨庆伟, 张福领 等. 啁啾脉冲的光谱整形 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(6): 1582~1585
- 3 P. Maurice, S. Jeff, M. Gerard. Chirped-pulse amplification of 100-fsec pulses [J]. *Opt. Lett.*, 1989, **14**(15): 797~799
- 4 C. P. Hauri, P. Schlup, G. Arisholm *et al.*. Phase-preserving chirped-pulse optical parametric amplification to 17.3 fs directly from a Ti:sapphire oscillator [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29** (12): 1369~1371
- 5 R. D. Boyd, J. A. Britten, D. E. Decker *et al.*. High-efficiency metallic diffraction gratings for laser applications [J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(10): 1697~1706
- 6 M. D. Perry, R. D. Boyd, J. A. Britten *et al.*. High-efficiency multilayer dielectric diffraction gratings [J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(8): 940~942
- 7 J. Wang, Y. Jin, J. Shao *et al.*. Optimization design of an ultrabroadband, high-efficiency, all-dielectric grating [J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(2): 187~189
- 8 S. Palmier, J. Neauport, N. Baclet *et al.*. High reflection mirrors for pulse compression gratings [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(22): 20430~20439
- 9 J. Neauport, N. Bonod, S. Hocquet *et al.*. Mixed metal dielectric gratings for pulse compression [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(23): 23776~23783
- 10 F. Canova, O. Uteza, J.-P. Chambaret. High-efficiency, broad band, high-damage threshold high-index gratings for femtosecond pulse compression [J]. *Opt. Express*, 2007, **15** (23): 15324~15334
- 11 J. Wang, Y. Jin, J. Ma *et al.*. Design and analysis of broadband high efficiency pulse compression grating [J]. *Appl. Opt.*, 2010, **49**(16): 2969~2977
- 12 K. Hehl, J. Bischoff, U. Mohaupt *et al.*. High-efficiency dielectric reflection gratings: design, fabrication, and analysis [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(30): 6257~6271
- 13 Zhou Yun, Shen Su, Ye Yan *et al.*. Research on the characteristic of subwavelength metal grating polarizers with a high reflective-index dielectric layer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 1158~1161
周 云, 申 溯, 叶 燕 等. 带有高折射率介质层的金属光栅偏振器特性的研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(4): 1158~1161
- 14 Zhang Xiaojuan, Qiao Guanjun, Liu Hanchen. Simulated annealing algorithm for multi-layer optical thin films [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(12): 3660~3665
张晓娟, 乔冠军, 刘汉臣. 多层光学薄膜模拟退火算法的研究 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(12): 3660~3665
- 15 Fan Shuwei, Zhou Qinghua, Li Hong. Research of optimization design of groove diffraction grating profile parameters [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(11): 3133~3139
樊叔维, 周庆华, 李 红. 槽型衍射光栅结构参数优化设计研究 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(11): 3133~3139
- 16 M. G. Moharam, E. B. Grann, D. A. Pommet. Formulation for stable and efficient implementation of the rigorous coupled-wave analysis of binary gratings [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1995, **12**(5): 1068~1076
- 17 M. G. Moharam, D. A. Pomment, E. B. Grann. Stable implementation of the rigorous coupled-wave analysis of surface-relief gratings: enhanced transmittance matrix approach [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1995, **12**(5): 1077~1086