

文章编号: 0253-2239(2006)05-0652-5

多层介质膜脉宽压缩光栅的严格矢量分析*

刘世杰^{1,2} 孔伟金^{1,2} 沈自才^{1,2} 邵建达¹ 贺洪波¹ 范正修¹

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)
(² 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 用于展宽和压缩激光脉冲的多层膜脉宽压缩光栅是由多层介质高反膜和位于其顶层的浮雕光栅构成。以设计的高反射多层膜为基础,利用傅里叶模式理论分析了其衍射场分布,给出了 TE 波自准直角入射的使用条件下,多层介质膜脉宽压缩光栅衍射效率的表达式。以 -1 级衍射效率为评价函数,分别讨论了 HfO₂ 和 SiO₂ 为顶层材料时,多层膜脉宽压缩光栅 -1 级衍射效率高于 0.95 的光栅结构参量范围。结果表明,在该条件下,选择 HfO₂ 为顶层材料时,光栅结构参量有较大的取值范围。给出了优化的光栅结构参量,并分析了光栅制作误差及其使用条件的宽容度,对光栅制作工艺和使用具有一定的指导意义。

关键词: 光栅; 衍射; 模式理论; 多层介质膜; 衍射效率; 自准直角

中图分类号: TB132 文献标识码: A

Rigorous Vector Analysis of Multi-Layer Dielectric Film Pulse Compression Gratings

Liu Shijie^{1,2} Kong Weijing^{1,2} Shen Zicai^{1,2} Shao Jianda¹ He Hongbo¹ Fan Zhengxiu¹

(¹ Shanghai Institute of Fine Mechanics and Optics, the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)
(² Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract: The multi-layer film pulse compression grating used in expanding and compressing laser pulse is composed of multi-layer dielectric film with high reflectance and relief gratings on its top. Based on the designed multi-layer film with high reflectance, the distribution of diffraction field of multi-layer pulse compression gratings is analyzed by Fourier modal theory and the expression of its diffraction efficiency is given on the condition of transverse electric field incidence at Littrow angle. With the merit function of the first order diffraction efficiency of multi-layer dielectric film gratings, the grating parameters, with which the first order diffraction efficiency is higher than 0.95, are discussed when materials of top layer are HfO₂ and SiO₂, respectively. The results show that a larger grating parameter range is got with HfO₂ than SiO₂. Optimized structure parameters of gratings are given and errors of grating fabrication and tolerances in use are discussed, which gives some theoretical guiding to the fabrication technics and applications.

Key words: gratings; diffraction; modal theory; multi-layer dielectric film; diffraction efficiency; Littrow angle

1 引 言

近年来,有关短脉宽、高峰值功率超短脉冲产生和放大的研究工作在国内外广泛开展^[1,2]。啁啾脉冲放大技术^[3,4]的提出和应用,使脉冲激光光强提高到 10²⁰ W/cm² 数量级,用于展宽和压缩激光脉冲的脉宽压缩光栅是该技术中的核心元件。在脉宽压缩光栅的研发过程中,多层介质膜脉宽压缩光栅(Multi-layer dielectric grating, MDG)由于具有设计灵活、高衍射

效率和高损伤阈值等优点而被广泛采用^[5]。

MDG 是由多层高反射介质膜和位于其顶层的光栅浮雕结构构成的, H. Wei 等^[6]用 S 矩阵分析了 MDG 产生高衍射效率的物理机理。在设计时,首先要得到高反射介质膜,然后在此基础上进一步设计和优化顶层光栅浮雕结构参量,从而得到高衍射效率的 MDG 结构。在已有的工作中^[7,8],多以 HL 或 H2L 膜系为高反膜,以高折射率的 HfO₂ 作顶层光栅材料

* 国家自然科学基金(10376040)资助课题。

作者简介: 刘世杰(1979~),男,陕西汉中,中国科学院上海光学精密机械研究所博士研究生,主要从事衍射光学和薄膜光学的研究。E-mail: hsyliu@163.com

收稿日期: 2005-05-30; 收到修改稿日期: 2005-10-17

设计和制作 MDG。一个较好的设计结果依赖于底层高反膜的优化设计^[9]、顶层光栅材料的选择以及光栅结构参数的优化。事实上,低折射率 SiO₂ 材料比较容易刻蚀,而且有较高的抗损伤阈值^[10],因此探讨以 SiO₂ 作顶层光栅材料对提高 MDG 的性能也有重要的意义。

2 光栅参量设计分析

MDG 结构如图 1 所示,它由多层介质高反膜和位于其上的光栅浮雕结构构成。高反膜由高折射率为 n_H 的膜料和低折射率为 n_L 的膜料制备而成,其结构可由 (HL)^{*p*} 或 (H₂L)^{*p*} 膜系优化设计得出^[9] (其中 *p* 为周期数)。位于顶层的光栅,其截面在 *xz* 平面内,栅线沿 *y* 方向,周期为 *T*。基底材料的折射率为 n_{sub} 。按照傅里叶模式理论^[11],对 MDG 按构成材料分布进行水平分层处理,沿 *z* 方向分为 *N* 层,其中光栅结构位于第 2 层(图 1)。在每一分层,电磁场满足麦克斯韦方程组,一般 MDG 的使用条件为 TE 波自准直角度入射,这使麦克斯韦方程组得到很大简化。由于光栅具有周期结构,电磁场可以展开为傅里叶级数形式,从而使麦克斯韦方程组转化为代数方程组,再根据边界条件和初始条件就可以求解 MDG 的电磁场分布。

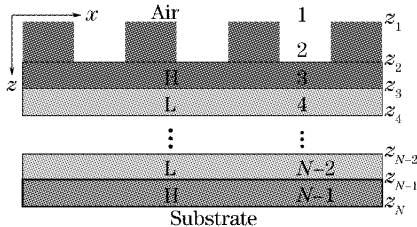


图 1 多层介质膜光栅分层结构示意图

Fig. 1 Structure of multi-layer dielectric film grating

在 MDG 的设计中, -1 级衍射效率受到关注。根据定义, MDG 的第 *m* 级衍射效率为

$$\eta_m^R = \bar{S}_{mz}^R / \bar{S}_{1z}^R = \text{Re}[E_{ym}^R (H_{zm}^R)^*] / \cos \theta, \quad (1)$$

其中 \bar{S}_{1z}^R 、 \bar{S}_{mz}^R 分别为入射波和第 *m* 级衍射波的能量密度 *z* 方向分量对时间的平均值, E_{ym}^R 和 H_{zm}^R 分别为沿 *m* 级次方向上的电场和磁场分布, θ 为入射角度。

在自准直入射条件下, MDG 的 -1 级衍射效率主要取决于光栅的结构参量(占宽比,槽深)和顶层剩余膜厚度,从理论上分析和优化这些参量,对于工艺实验将有重要的指导意义。下面以设计的多层高反膜 H₃L(H₂L)⁹H_{0.5}L^[9]为基础,用 MDG 整体 -1 级衍射效率为评价函数,设计光栅的这些结构参量。具体数值分析参量为工作波长: 1.053 μm; 自

准直入射角度: 51.2°; 光栅周期: 0.676 μm; 折射率: $n_H = n_{HfO_2} = 1.96$, $n_L = n_{SiO_2} = 1.46$, $n_{Air} = 1$, $n_{sub} = 1.52$ 。在自准直入射的使用条件下,光栅的周期大小已确定。影响 MDG 衍射效率的主要因素有占宽比(σ , 定义为沿 *x* 方向光栅脊与周期的比值)、槽深(h_1)、顶层介质膜的剩余厚度(h_2)和制作光栅层的介质材料。在数值分析时,以 MDG -1 级衍射效率为评价函数,其满足 $\eta_m^R \geq 0.95$ 。下面给出分析结果。

首先考虑顶层材料为高折射率材料 HfO₂ 的情况。图 2(a)~图 2(c)是顶层厚度 h ($h = h_1 + h_2$) 分别取 0.2 μm、0.3 μm 和 0.4 μm 时, MDG -1 级衍射效率与占宽比 σ 、槽深 h_1 的关系, 实线包络以内为效率大于 0.95 的区域。可以看出,若顶层膜厚度不变,衍射效率随着槽深 h_1 的增大而增大。另外,当顶层膜厚度改变时,获得高衍射效率的最佳占宽比取值范围也有所变化。图 2(d)中,实线和点线为 σ 取 0.3 时, MDG -1 级衍射效率与槽深 h_1 、顶层剩余厚度 h_2 的关系,实线包络以内为效率大于 0.95 的区域,该区域沿 h_2 方向呈准周期分布;虚线为顶层膜厚度 h 不同时,槽深 h_1 和顶层剩余厚度 h_2 的线性关系,从左到右, h 的取值分别为 0.2 μm、0.3 μm、0.4 μm 和 0.5 μm。由图 2(d)可以得出,当顶层膜厚度给定后, h_1 和 h_2 的取值范围位于与等高线重叠的线段内,在单个周期分布区域内,随着顶层膜厚度 h 的变大,一般需要刻蚀较深的沟槽深度才能使 MDG 获得高衍射效率。例如,若顶层膜厚分别取 0.2 μm、0.3 μm 和 0.4 μm, 获得衍射效率为 0.95 的最小沟槽深度分别为 0.126 μm、0.215 μm 和 0.327 μm。在 MDG 的制作工艺中,一方面,镀制厚膜过程中引入的厚度误差会使衍射效率设计值向长波方向漂移;另一方面,刻蚀较深的沟槽会带来一些负面影响,例如掩膜抗刻蚀能力的降低,光栅边墙陡度减小等。因此,顶层膜厚度 h 和槽深 h_1 的取值都不宜太大,而且也要同时兼顾镀膜和刻蚀光栅过程中引入误差的宽容度。因此, σ 和 h_1 宜选取其所在区间的中值,这样可以避免由制作误差引起的衍射效率低于设计值。根据以上分析,可以得到顶层为 HfO₂ 的 MDG 的光栅设计参量:若顶层膜厚度为 0.2 μm, 占宽比 σ 可取 0.35, 光栅沟槽深 h_1 度取 0.16 μm, MDG -1 级衍射效率为 0.994。

一般情况下,与 HfO₂ 相比, SiO₂ 有较高的抗损伤阈值,因此有必要考察顶层材料为 SiO₂ 的情况。图 3(a)~图 3(c)是顶层厚度 h 分别取 0.8 μm、0.9 μm 和 1 μm 时, MDG -1 级衍射效率与占宽比 σ 、

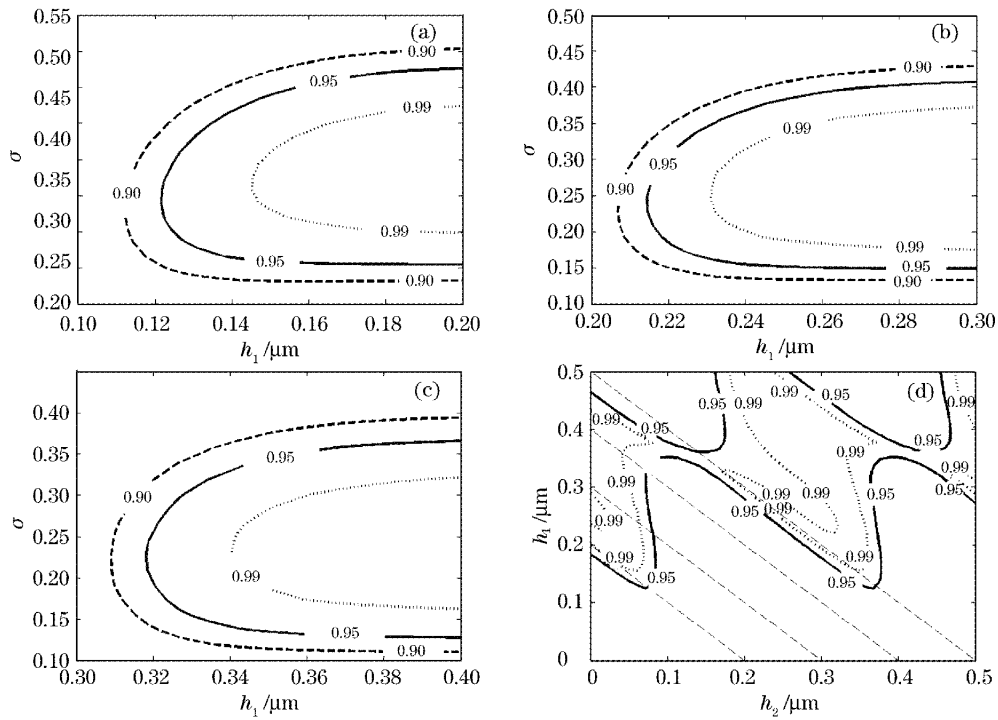


图 2 (a)~(c) MDG-1 级衍射效率与占宽比、槽深的关系, (d) MDG-1 级衍射效率与槽深、顶层剩余 HfO_2 厚度的关系
 Fig. 2 (a)~(c) Relation of the minus first-order diffraction efficiency with duty cycle and depth of groove, (d) relation of the minus first-order diffraction efficiency with depth of groove and top residual thickness

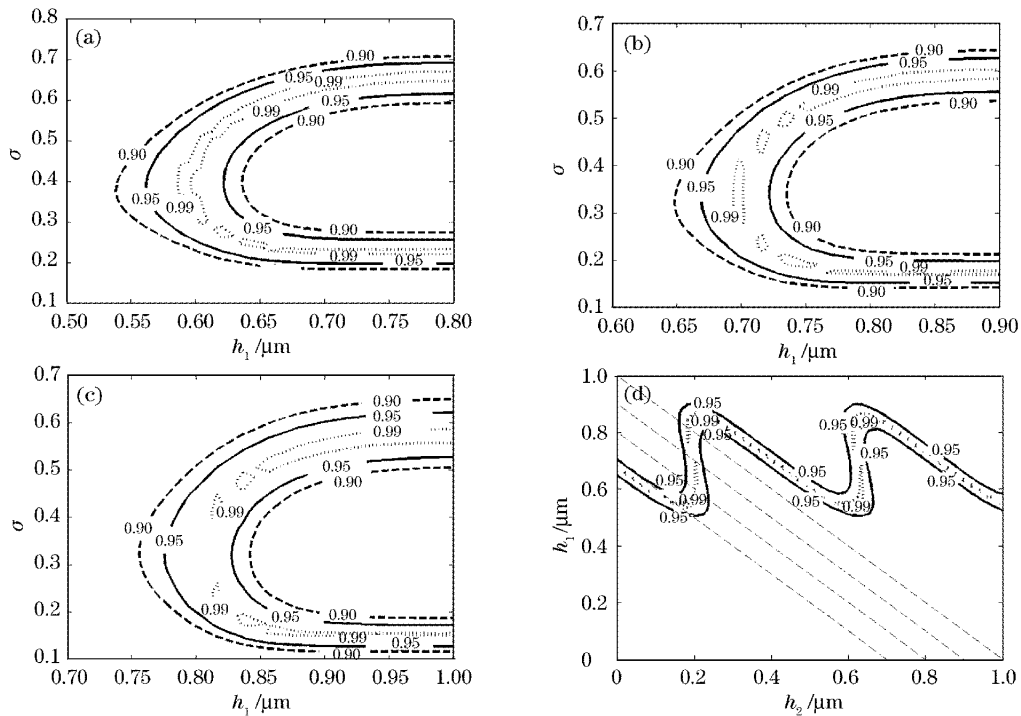


图 3 (a)~(c) MDG-1 级衍射效率与占宽比、槽深的关系, (d) MDG-1 级衍射效率与槽深、顶层剩余 SiO_2 厚度的关系
 Fig. 3 (a)~(c) Relation of the minus first-order diffraction efficiency with duty cycle and depth of groove, (d) relation of the minus first-order diffraction efficiency with depth of groove and top residual thickness

槽深 h_1 的关系, 实线包围以内为效率大于 0.95 的带状区域。图 2(d) 中, 实线和点线为 σ 取 0.4 时,

MDG-1 级衍射效率与槽深 h_1 , 顶层剩余厚度 h_2 的关系, 实线包围以内为效率大于 0.95 的区域; 虚

线为顶层膜厚度 h 不同时, 槽深 h_1 和顶层剩余厚度 h_2 的线性关系, 从左到右, h 的取值分别为 $0.7 \mu\text{m}$ 、 $0.8 \mu\text{m}$ 、 $0.9 \mu\text{m}$ 和 $1 \mu\text{m}$ 。衍射效率的变化规律与顶层材料为 HfO_2 的情况基本相同。不同之处在于, 首先, 顶层 SiO_2 膜的厚度和光栅沟槽深度的取值都比较大, 例如在图 3(d) 中顶层膜厚的最小值须为 $0.65 \mu\text{m}$; 其次, 在带状分布区域内, h_1 的取值范围显著缩小。同样考虑到工艺误差的影响, 可以得到顶层为 SiO_2 材料的 MDG 的设计参量: 若顶层膜厚度为 $0.8 \mu\text{m}$, 占宽比 σ 可取 0.4 , 光栅沟槽深 h_1 度取 $0.61 \mu\text{m}$, 此时 MDG 的 -1 级衍射效率为 0.978 。

3 误差分析

3.1 光栅制作误差分析

在制备顶层光栅过程中, 由于工艺条件的限制, 首先, 占宽比的精确控制得不到满足, 从而使制备的光栅的占宽比与设计值相比存在一定偏差。另外, 沟槽的深度不一定完全符合设计要求, 可能存在欠刻蚀和过刻蚀的情况。最后, 在刻蚀过程中, 保护掩膜难免也被刻蚀, 尤其是在边界区域, 这就会导致刻蚀后光栅的形貌发生变化。因此, 这几种刻蚀误差也会明显影响 MDG -1 级效率, 下面用 2 部分设计出的光栅结构参量对这些误差作以分析。图 4 给出了占宽比偏差和 MDG -1 级衍射效率的关系。实线、虚线分别表示顶层材料为 HfO_2 和 SiO_2 的情况, 相应地, 衍射效率高于 0.95 的占宽比范围分别为 $0.24 \sim 0.5$ 和 $0.2 \sim 0.57$ 。这些范围也可以通过 MDG 高衍射效率的设计区域反映出来, 分别如图 2(a) 和图 3(a) 所示。

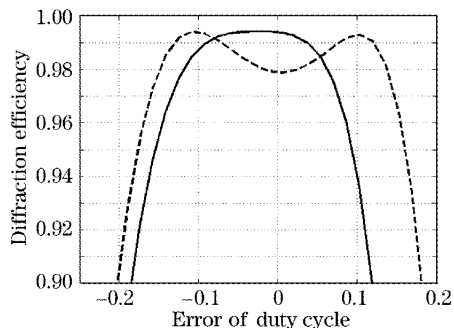


图 4 占宽比误差和 MDG -1 级衍射效率的关系
(顶层材料: 实线 HfO_2 , 虚线: SiO_2)

Fig. 4 Relation between the minus first-order diffraction efficiency and duty cycle error (top-layer material: solid line for HfO_2 , dash line for SiO_2)

图 5 给出了刻蚀误差和 MDG -1 级衍射效率的关系。实线为顶层材料为 HfO_2 的结果, 可以看出, 欠刻蚀会降低 MDG 的衍射效率, 过刻蚀在膜厚度范围内基本不降低衍射效率值。虚线为顶层材料为 SiO_2 的结果, 欠刻蚀和过刻蚀都需要控制在一定范围内, MDG 衍射效率才不低于 0.95 。对于两种顶层材料的 MDG, 衍射效率高于 0.95 的沟槽刻蚀深度范围分别为 $0.122 \sim 0.200 \mu\text{m}$ 和 $0.562 \sim 0.621 \mu\text{m}$ 。

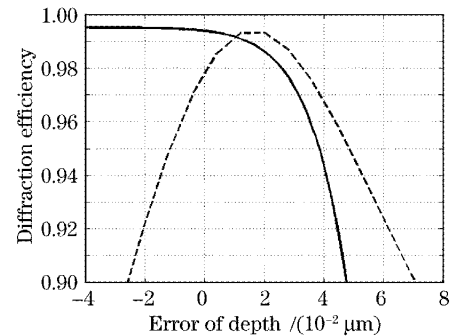


图 5 刻蚀误差和 MDG -1 级衍射效率的关系
(顶层材料: 实线 HfO_2 , 虚线: SiO_2)

Fig. 5 Relation between the minus first-order diffraction efficiency and etching error (top-layer material: solid for HfO_2 , dash line for SiO_2)

由于光栅脊边缘被刻蚀, 实际光栅形貌一般为梯形结构。定义梯形斜边和底边的夹角为边墙角。在分析时, 假定光栅的沟槽深度没有刻蚀误差。图 6 中实线和虚线分别为光栅材料取 HfO_2 和 SiO_2 时 MDG -1 级效率和边墙角的关系。可以得出, 随着边墙角度的减小, 衍射效率大体都呈下降趋势, 而且顶层为 SiO_2 材料时, 衍射效率下降幅度较大。在 MDG 的这两个设计中, 只有把光栅的边墙角分别控制在高于 71° 和 82.4° 以上, -1 级效率才能大于 0.95 。

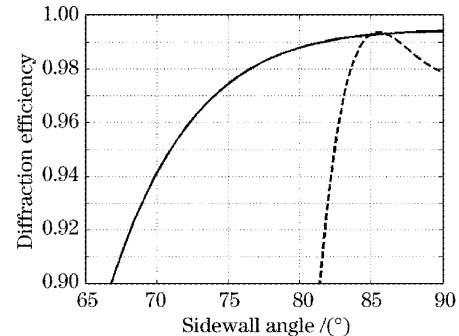


图 6 MDG -1 级衍射效率和边墙角度的关系
(顶层材料: 实线 HfO_2 , 虚线 SiO_2)

Fig. 6 Relation between the minus first-order reflectance of MDG and sidewall angle (material of top layer: solid line for HfO_2 , dash line for SiO_2)

3.2 MDG 使用条件误差分析

MDG 设计的使用条件是一级自准直角入射,且入射面在光栅截面 xz 内。在实际使用的时候,入射角度的偏离以及入射面的改变都会影响到 MDG 一级衍射效率。设入射面和光栅截面 xz 的夹角为 ϕ ,图 7 给出了 MDG 一级衍射效率与 θ 和 ϕ 的关系,可以看出 θ 和 ϕ 在一定范围内变化,MDG 仍可保持较高的衍射效率。 ϕ 的取值呈对称关系,且顶层材料为 HfO_2 的 MDG, θ 和 ϕ 的可变范围都要比顶层材料为 SiO_2 的 MDG 要大一些。对于前者 θ 和 ϕ 可变范围分别为 $(51.2 - 4.1^\circ) \sim (51.2 + 5^\circ)$ 和 $(0 - 16.4^\circ) \sim (0 + 16.4^\circ)$,而对于后者 θ 和 ϕ 可变范围分别为 $(51.2 - 1.7^\circ) \sim (51.2 + 1.5^\circ)$ 和 $(0 - 7.6^\circ) \sim (0 + 7.6^\circ)$ 。

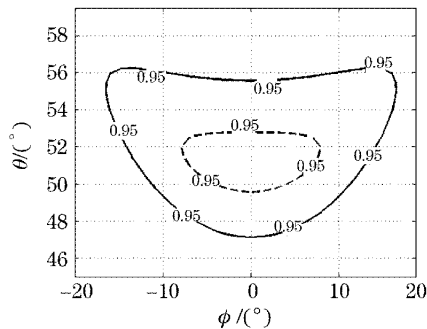


图 7 MDG 一级衍射效率与入射角 θ 、入射面和光栅截面夹角 ϕ 的关系(顶层材料: 实线 HfO_2 , 虚线 SiO_2)

Fig. 7 The minus first-order diffraction efficiency of MDG as a function of incident angle θ and ϕ between incident plane and grating section (material of top layer: solid line for HfO_2 , dash line for SiO_2)

由以上分析可以看出,当 MDG 顶层材料取 SiO_2 时,光栅结构参量的容差范围都要比 HfO_2 材料要窄,而且在使用条件方面,前者也要比后者更苛刻一些。但是 SiO_2 材料比较容易刻蚀,而且有较高的抗损伤阈值。因此若以 SiO_2 为光栅材料,需要严格控制工艺条件和使用条件。

4 结 论

傅里叶模式理论是一种分析 MDG 的严格矢量方法,可以有效地实现 MDG 设计。以 $\text{H}_3\text{L}(\text{H}_2\text{L})^9\text{H}_0.5\text{L}$ 为高反膜,分别讨论了顶层材料为 HfO_2 和 SiO_2 的 MDG 结构,通过数值分析得到以下结论:

1) 顶层材料为 HfO_2 的 MDG,在给定的厚度范围内都可以实现高衍射效率,一级衍射效率大于 0.95 的区域随着顶层厚度的增加存在准周期变化。

结合工艺条件和误差分析,得到顶层厚膜 $h = 0.20 \mu\text{m}$ 为最佳设计,此时,占宽比 σ 可取 0.35,光栅沟槽深 h_1 度取 $0.16 \mu\text{m}$ 。

2) 顶层材料为 SiO_2 的 MDG,只有当顶层厚度比较大时才可以实现高衍射效率,一级衍射效率大于 0.95 的区域随着顶层厚度的增加也呈准周期变化。结合工艺条件和误差分析,得到顶层厚膜 $h = 0.80 \mu\text{m}$ 为最佳设计,占宽比 σ 可取 0.4,光栅沟槽深 h_1 度取 $0.61 \mu\text{m}$ 。

3) 不论是 HfO_2 , 还是 SiO_2 为顶层光栅材料,光栅结构参量都在一定容差范围,使 MDG 获得较高的衍射效率。两者相比而言,顶层为 HfO_2 的 MDG 更容易实现,而顶层为 SiO_2 的 MDG 要求更苛刻一些。

参 考 文 献

- 1 T. Ditmire, M. D. Perry. Terawatt Cr-LiSrAlF₆ laser system [J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**: 426~428
- 2 Xu Jianhua, Zhang Weizai, Liu Zhiwu *et al.*. Generation and compression of 1.3 μm ultrashort pulses from a DFB diode laser [J]. *Acta Optic Sinica*, 1994, **14**(4): 360~363 (in Chinese)
徐建华,张位在,刘枝伍等. 1.3 μm DFB 半导体激光超短脉冲的产生及其压缩[J]. *光学学报*, 1994, **14**(4): 360~363
- 3 Maurice Pessot, Jeff Squier, Gerard Mourou *et al.*. Chirped-pulse amplification of 100-fsec pulses [J]. *Opt. Lett.*, 1989, **14**(15): 797~799
- 4 Yan Jianjun, Sun Yanling, Ruan Shuangchen *et al.*. Study on single grating stretcher in chirped-pulse amplification [J]. *Acta Optic Sinica*, 1998, **18**(4): 457~461 (in Chinese)
杨建军,孙艳玲,阮双琛等. 啁啾脉冲放大系统中光栅展宽器的性能与实验研究[J]. *光学学报*, 1998, **18**(4): 457~461
- 5 M. D. Perry, R. D. Boyd, J. A. Britten *et al.*. High-efficiency multi-layer dielectric diffraction gratings [J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(8): 940~941
- 6 Hongbo Wei, Lifeng Li. All-dielectric reflection gratings: a study of the physical mechanism for achieving high efficiency [J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(31): 6255~6260
- 7 Lifeng Li, Jeffrey Hirsh. All-dielectric high-efficiency reflection gratings made with multilayer thin-film coatings [J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(11): 1349~1351
- 8 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): 1124~1135
- 9 Weijin Kong, Jianda Shao, Weili Zhang *et al.*. Design and character analysis of Multi-layer dielectric used in pulse compressed gratings [J]. *Acta Optic Sinica*, 2005, **25**(5): 701~706 (in Chinese)
孔伟金,邵建达,张伟丽等. 用于脉宽压缩光栅的多层膜设计和性能分析[J]. *光学学报*, 2005, **25**(5): 701~706
- 10 B. C. Stuart, M. D. Feit, A. M. Rubenchik *et al.*. Laser-induced damage in dielectrics with nanosecond to subpicosecond pulses [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1995, **74**: 2248~2251
- 11 Tang Xiongguai, Fu Kexiang, Wang Zhiheng *et al.*. Analysis of rigorous modal theory for arbitrary dielectric gratings made with anisotropic materials [J]. *Acta Optic Sinica*, 2002, **22**(7): 774~779 (in Chinese)
唐雄贵,傅克祥,王植恒等. 任意各向异性介质光栅的严格模式理论分析[J]. *光学学报*, 2002, **22**(7): 774~779