

相移 Rugate 薄膜空间滤波器的设计

章 瑛^{1,2} 易 葵¹ 齐红基¹ 邵建达¹

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

摘要 介绍了相移 Rugate 薄膜空间滤波器的基本结构和原理, 设计了相移 Rugate 薄膜滤波器, 根据实际制备的条件进行了误差分析, 给出了制备技术需要达到的精度和所需要的薄膜材料的消光系数, 计算了相应的损耗, 并分析了空间滤波器内部的电场分布。

关键词 薄膜; 相移; 空间滤波器; 消光系数

中图分类号 O484 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201441.1007001

Design of Phase-Shifted Rugate Thin Film Spatial Filter

Zhang Ying^{1,2} Yi Kui¹ Qi Hongji¹ Shao Jianda¹

(¹ Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Science, Shanghai 201800, China)
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract The basic structure and principles of phase-shift Rugate thin spatial filter is presented. The phase-shifted Rugate film filter is designed and the error analysis is prepared in accordance with the actual conditions. The corresponding loss and extinction coefficient and the preparation of technical precision are discussed to achieve excellent performance for the preparation of the thin film. The corresponding loss and internal electric field of the phase-shift Rugate film filter is calculated.

Key words thin film; phase-shifted; spatial filter; extinction coefficient

OCIS codes 310.6845; 050.5080; 290.2200

1 引言

空间滤波器是大型高功率激光系统中必不可少的光学器件之一, 具有滤除傅里叶频谱中的高频分量、有效改善光束质量等作用^[1-3]。按是否对光束进行聚焦, 空间滤波器可分为聚焦型和非聚焦型。其中, 聚焦型中最为典型的结构是针孔滤波器, 针孔滤波器由两片傅里叶透镜和一个针孔板组成, 针孔位于两透镜的公共焦点处, 此类针孔空间滤波器由于其聚焦原理, 存在一些固有的缺陷, 导致其在高功率激光系统中的应用受到了较大的限制。主要表现为: 1) 针孔滤波器焦平面处光强非常强, 容易诱发等离子体, 进而产生等离子体堵孔等现象^[4-5]; 2)

光束聚焦到针孔时, 容易导致材料出现热致损坏^[6]; 3) 透镜焦距较长, 所占空间较大, 不利于系统的紧凑化^[7-9]。透镜与针孔的组合, 起到了限制提升激光器输出功率水平的瓶颈作用。在空间低通滤波器中避免使用透镜, 是克服针孔滤波技术上述缺点的有效措施。

相比聚焦型结构, 非聚焦型滤波器的特点是无透镜、无针孔、光束不聚焦, 具有能承受激光功率高、外形尺寸小等优点。其中, Rugate 薄膜作为一种典型的非聚焦型滤波器逐渐成为近几年空间滤波技术研究领域的研究热点^[10-14]。美国国家点火装置 (NIF) 和神光 III 原型装置的放大系统的针孔滤波器

收稿日期: 2014-03-13; 收到修改稿日期: 2014-04-15

作者简介: 章 瑛(1981—), 女, 博士研究生, 主要从事 Rugate 薄膜滤波器的设计、制备和性能等方面的研究。

E-mail: zhangying0127@163.com

导师简介: 邵建达(1964—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事高功率激光薄膜、软 X 射线激光薄膜、激光对光学薄膜破坏机制、超薄膜生长特性、半导体材料特性等方面的工作。E-mail: jdsiao@siom.ac.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

的典型长度约为 20 m(滤波器透镜至针孔间距大小等于 10 m)。如果换成非聚焦型,则单个滤波器厚度减为分米量级。非聚焦型滤波部件适合装入星载、机载轻小型激光器内。2007 年,美国利弗莫尔国家实验室提出利用 Rugate 反射片来取代针孔滤波在 NIF 应用的设想。现有文献[15-19]给出的反射型空间滤波器的角谱选择性较差,还远未达到惯性约束聚变驱动装置对其角谱选择性带宽达到亚毫弧度的要求。郑光威等[20]对理想情况设计相移 Rugate 薄膜滤波器的相关问题进行了探讨,得到一些有意义的结果。本文取得相移型 Rugate 薄膜空间滤波器的研究发展,是探索非聚焦型滤波器取代聚焦滤波器的一次成功尝试。

根据相移 Rugate 薄膜滤波器的基本结构和原理,设计了相移 Rugate 薄膜滤波器。根据实际制备的条件进行了误差分析,给出了制备技术需要达到的精度和所需要的薄膜材料的消光系数,计算了相应的损耗,分析了滤波器内的电场分布。

2 理论分析

相移 Rugate 薄膜的滤波原理是建立在法布里-珀罗(F-P)滤波器基础之上的。为了获得通带到截止带更平滑更尖锐的过渡,F-P 腔两侧的反射膜系用 Rugate 薄膜替代。图 1 给出了单色平面波(MPW)斜入射至相移 Rugate 薄膜,并在其中透射和反射的示意图。

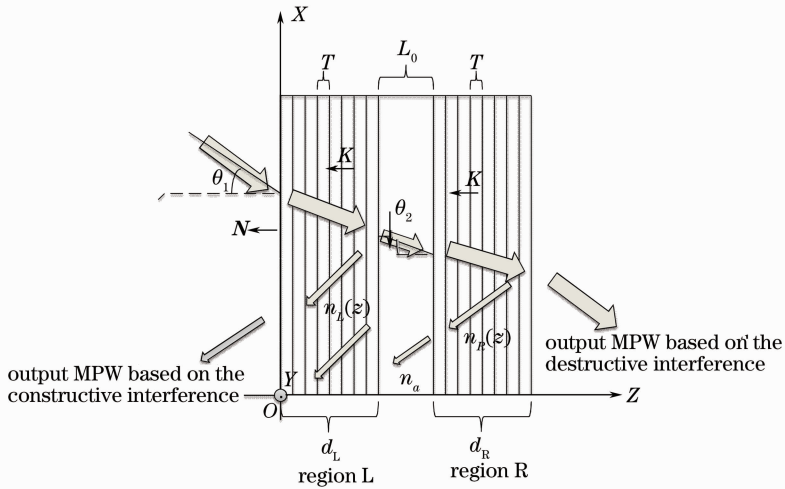


图 1 相移 Rugate 薄膜对单色平面波的透射和反射示意图

Fig. 1 Schematic diagram phase-shifted Rugate spatial filter of the transmission and reflection of monochromatic plane wave

图中 $XYZO$ 为直角坐标系, XOZ 在纸面内, Y 轴垂直于纸面且方向朝纸面外。MPW 表示单色平面波, T 表示光栅周期, N 表示薄膜前表面法向单位矢量, d_L 和 d_R 分别表示跃变相位左右两侧薄膜厚度, L_0 表示引起跃变相位的等效光程, n_0 和 n_G 分别表示薄膜上方以及基底的折射率, $n_L(z)$ 和 $n_R(z)$ 分别表示薄膜左边和右边的折射率,其折射率表达式为

$$n_L(z) = n_a + n_p \sin(Kz + \Phi_{GL}), \quad (1)$$

$$n_R(z) = n_a + n_p \sin[K(z - d_L - L_0) + \Phi_{GR}], \quad (2)$$

式中 n_p 表示相移左右两侧膜层折射率调制度之差,

n_a 表示薄膜的平均折射率, Φ_{GL} 和 Φ_{GR} 分别表示左右两边的初始相位, $K(z) = 2\pi/T$ 。

由图 1 可以看出,相移 Rugate 薄膜与带通滤光片相类似,由两块 Rugate 薄膜和中间一个腔构成,跃变相位或左右两光栅之间的间距以及光栅的初始相位必须满足下式

$$\Phi_{GL} + 2\pi \frac{2n_a L_0 \cos \theta_2}{\lambda_0} + \Phi_{GR} = m\pi, \quad (3)$$

$(m = 1, 2, 3, \dots)$

如果左右两边 Rugate 膜系与腔 L_0 界面处的折射率与腔的折射率相等时,由传输矩阵法,可知该结构的输入与输出光场复振幅表达式如下[21]:

$$\begin{bmatrix} 1 \\ E_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_L & B_L \\ B_L^* & A_L^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \exp(-2\pi n_a L_0 \cos \theta_2 / \lambda_0) & 0 \\ 0 & \exp(2\pi n_a L_0 \cos \theta_2 / \lambda_0) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} A_R & B_R \\ B_R^* & A_R^* \end{bmatrix} \frac{1}{t_{n+1}} \begin{bmatrix} 1 & r_{n+1} \\ r_{n+1} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_t \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中矩阵 $\begin{bmatrix} A_L & B_L \\ B_L^* & A_L^* \end{bmatrix}$ 和 $\begin{bmatrix} A_R & A_R \\ B_R^* & B_R^* \end{bmatrix}$ 分别表示区域 L 和区域 R 的传输矩阵。

根据这一原理,以高功率激光系统中的波长 1064 nm 为例,用 Matlab 模拟出当入射平面波为 s 偏振相移型 Rugate 薄膜空间滤波器的光谱角谱,表 1 给出了模拟相移 Rugate 薄膜的参量数值。图 2 相移型 Rugate 薄膜空间滤波器的折射率轮廓示意图, $\Delta\lambda$ 表示波长与中心波长 1064 nm 之差。

表 1 模拟相移 Rugate 薄膜的参量数值

Table 1 Values of simulation phase-shift Rugate coating parameters

| Parameters | Value |
|--------------------------|--------|
| T/nm | 350 |
| λ_0/nm | 1064 |
| n_0 | 1.00 |
| θ_{10}/rad | 0.5233 |
| L_0/nm | 175 |
| n_G | 1.5 |
| n_a | 1.6 |
| n_p | 0.1 |

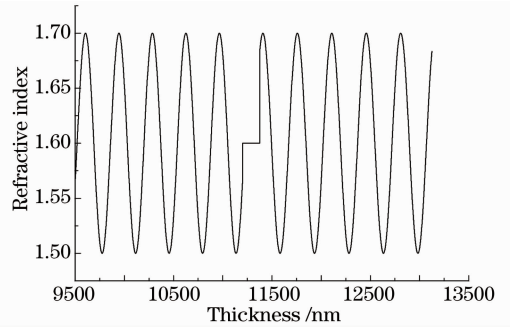


图 2 相移型 Rugate 薄膜空间滤波器的折射率轮廓示意图
Fig. 2 Refractive index distribution of phase-shift rugate filter

图 3 是相移型 Rugate 薄膜空间滤波器的设计结果,定义角谱峰值的半峰全宽为滤波器的角分辨率,计算结果表明相移型 Rugate 薄膜空间滤波器角分辨率达到了亚毫弧度的要求。

滤波器带宽既与 Rugate 反射镜的反射率有关,也与滤波器的腔长有关,更窄带宽的 Rugate 滤波器,可以通过增加腔长 L_0 或增加 Rugate 反射镜的反射率得到。增加 Rugate 反射镜反射率的方法主要是增加腔两端的周期数,周期数增加导致两端的厚度增加,进而反射率增加。

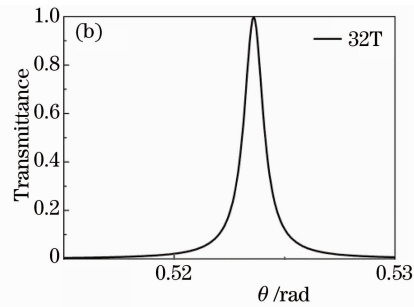
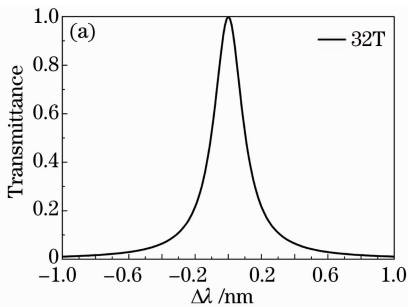


图 3 相移型 Rugate 薄膜空间滤波器的 (a) 光谱和 (b) 角谱

Fig. 3 (a) Transmittance spectra and (b) angular spectrum of phase-shift Rugate spatial filter

图 4 是引起跃变的等效光程是 L_0 时左右两侧厚度相等的 Rugate 反射镜的光谱和角谱图。图中给出了当平面波为 s 偏振,相移左右两侧的膜层厚度相等时,相移 Rugate 薄膜在角度 θ 下的光谱选择

性以及波长为 λ_0 下的角谱选择性随薄膜厚度的变化。从图 4 中可以看出,对于左右两侧膜层厚度相等的相移 Rugate 薄膜,随着薄膜厚度的增加,光谱选择性和角谱选择性带宽均呈减小趋势,因此通过

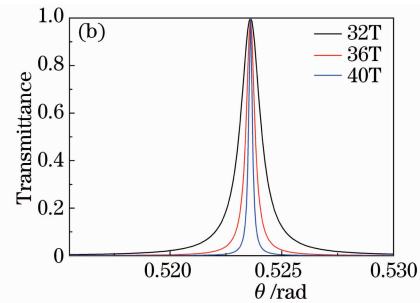
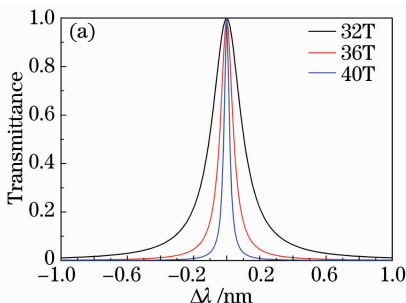


图 4 相移 Rugate 薄膜的 (a) 光谱和 (b) 角谱选择性随薄膜厚度的变化

Fig. 4 (a) Transmittance spectra and (b) angular spectrum of phase-shift rugate filter in different thicknesses

增加膜层厚度,可以降低其角谱选择性,以利于空间低通滤波的应用。

图 5 给出了当平面波为 s 偏振,增加腔长 L_0 时,相移 Rugate 薄膜在角度 θ 下的光谱选择性以及波长为 λ_0 下的角谱选择性随薄膜厚度的变化。从

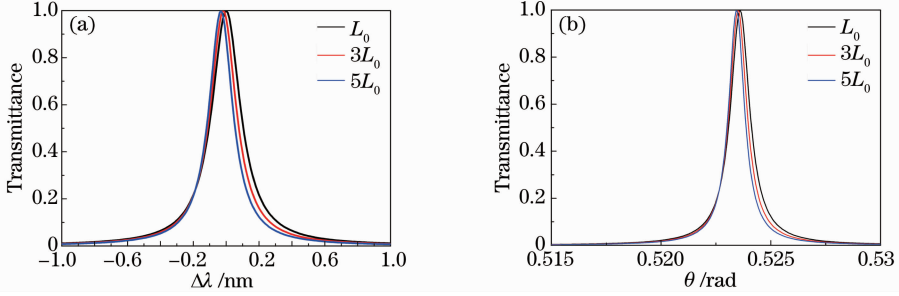


图 5 相移 Rugate 薄膜的(a)光谱和(b)角谱选择性随引起跃变的不同等效光程的变化

Fig. 5 (a) Transmittance spectra and (b) angular spectrum of phase-shift rugate filter in different equivalent optical paths

综上所述,可以增加 L_0 或增加 Rugate 反射镜厚度提高其角谱选择性,但是增加也不是没有上限的,随着 L_0 或 Rugate 反射镜厚度的增加,光谱和角谱的透射率会降低,而且腔长增加膜厚增加较少。周期增多膜厚增加比较大,工艺难度大,但是所带来的效果来应该是增加 Rugate 反射镜的厚度效果好。所以必须选择适当的 L_0 和 Rugate 反射镜厚度来达到角谱选择的目的。分析表明,在 5 倍 L_0 、Rugate 反射镜左右两边周期数为 40 时,能达到亚毫弧度的角谱选择性的目的。

图中可以看出:对于左右两侧膜层厚度相等的相移 Rugate 薄膜,随着薄膜级次的增加,光谱选择性和角谱选择性带宽均呈减小趋势,因此通过增加 L_0 ,可以降低其角谱选择性,以利于空间低通滤波的应用。

3 相移型 Rugate 滤光片的特性分析

3.1 随机误差分析

在实际制备过程中,会有各种误差产生,针对设计的相移型 Rugate 薄膜空间滤波器,对其加入随机误差进行计算,分别加入 0.01、0.001、0.0001 的随机误差。图 6 是加入 0.01 的随机误差的光谱和角谱,图 7 是加入 0.001 的随机误差后光谱和角谱选择性图,图 8 加入 0.0001 的随机误差后光谱和角谱选择性图。

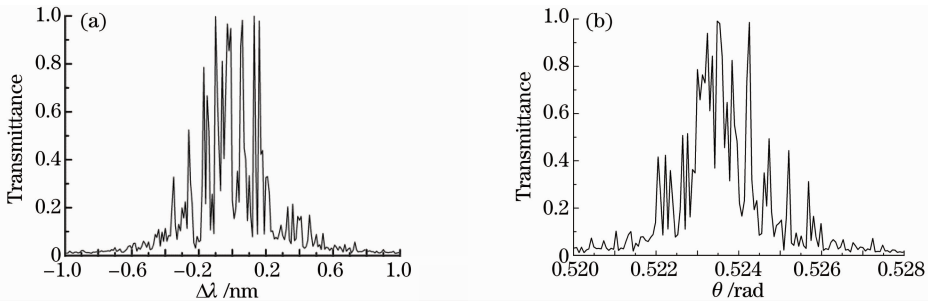


图 6 加入 0.01 的随机误差的(a)光谱和(b)角谱

Fig. 6 (a) Transmittance spectra and (b) angular spectrum of phase-shift rugate filter in 0.01 random error

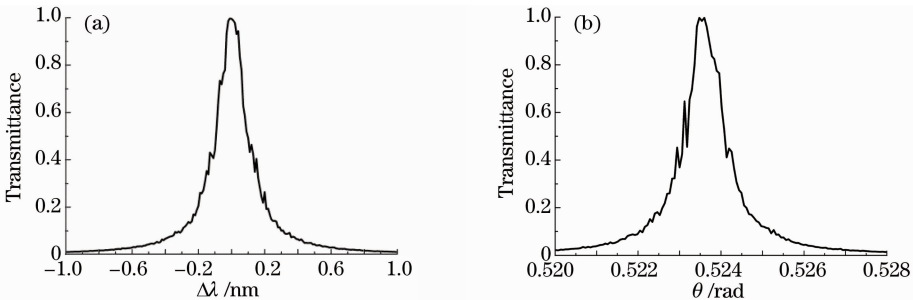


图 7 加入 0.001 的随机误差的(a)光谱和(b)角谱

Fig. 7 (a) Transmittance spectra and (b) angular spectrum of phase-shift rugate filter in 0.001 random error

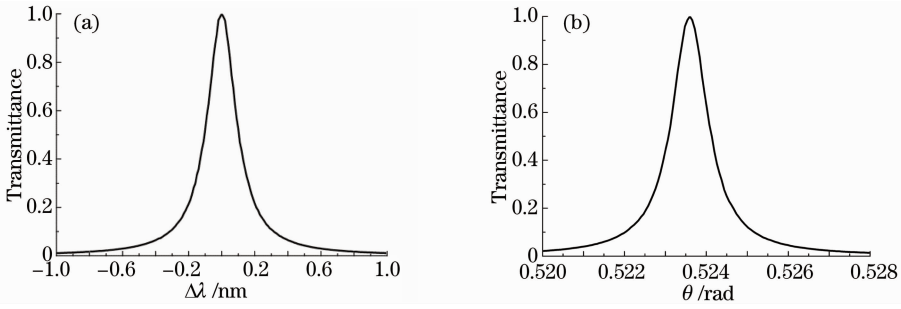


图 8 加入 0.0001 的随机误差后 (a) 光谱和 (b) 角谱

Fig. 8 (a) Transmittance spectra and (b) angular spectrum of phase-shift rugate filter in 0.0001 random error

图 8 表明制备出相移型 Rugate 薄膜滤波器控制精度要达到 0.0001 的水平。

3.2 损耗分析

在实际制备过程中,材料并不是理想的,会有或

多或少的损耗,针对这一情况,对设计的相移型 Rugate 薄膜空间滤波器的材料加入了 1×10^{-5} 、 5×10^{-6} 和 1×10^{-6} 的消光系数进行计算如图 9 所示。

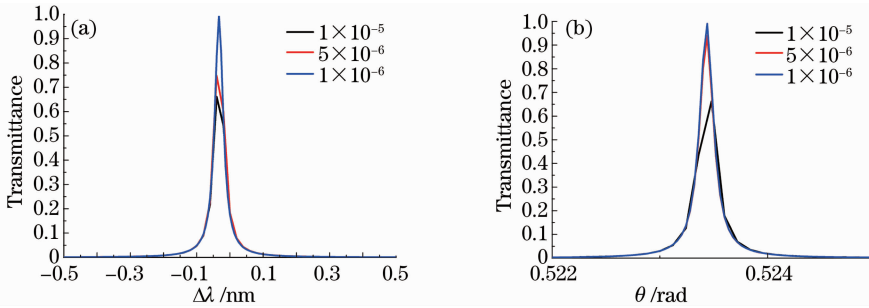


图 9 不同的消光系数下的相移 Rugate 薄膜的 (a) 光谱和 (b) 角谱

Fig. 9 (a) Transmittance spectra and (b) angular spectrum of phase-shift Rugate spatial filter in different extinction coefficients

图 9 表明要达到 99.5% 以上的透射率,消光系数需达到 10^{-6} 才能制备出满足要求相移型 Rugate 薄膜滤波器。

3.3 薄膜内部驻波场分析

薄膜内部驻波场是影响薄膜损耗大小和激光损伤阈值高低的重要因素,因此,对设计的相移 Rugate

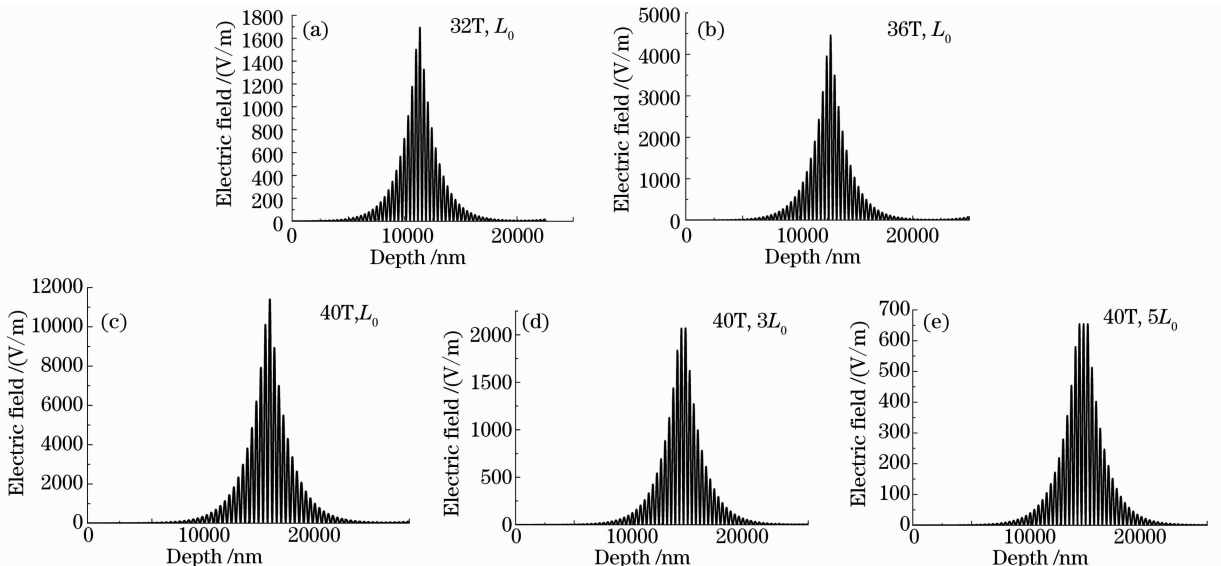


图 10 相移型 Rugate 薄膜空间滤波器内部的驻波场

Fig. 10 Electric field distribution of phase-shift Rugate spatial filter

薄膜空间滤波器计算了内部的驻波场。图 10 是用 Matlab 软件模拟出来的薄膜内部的驻波场。

从图 10 中可以看出:对于左右两侧膜层厚度相等相移 Rugate 薄膜空间滤波器,随着 Rugate 反射镜厚度的增加,薄膜内部的驻波场呈增大的趋势,而随着 L_0 的增加,膜内部的驻波场强基本不变,但是腔内强区的数目会增加。

4 结 论

从模拟的结果可以看出相移 Rugate 薄膜的角谱选择性达到了亚毫弧度,表明理想的相移 Rugate 薄膜滤波器在理论上具有可行性,但是薄膜型空间滤波器的性能主要取决于薄膜厚度控制精度及薄膜器件的环境稳定性,因此必须选择具有致密微结构和高的控制精度的制备技术,对其结果给了误差分析之后,表明现有的制备技术需要达到 0.0001 的控制精度。所制备材料的消光系数也是影响相移 Rugate 薄膜滤波器的透射率的重要因素,分析表明要达到 99.5% 以上的透射率,材料的消光系数需要达到 10^{-6} 时才能达到要求。此外,还计算了相移 Rugate 薄膜空间滤波器内部的驻波场,计算结果表明, Rugate 反射镜厚度在 $40T$,引起跃变的等效光程是 L_0 时空间滤波器内部的驻波场最小。

参 考 文 献

- 1 J T Hunt, J A Glaze, W W Simmons, *et al.*. Suppression of self-focusing through low-pass spatial filtering and relay imaging[J]. *Appl Opt*, 1978, 17(13): 2053—2057.
- 2 B M V Wonterghem, J R Murray, J H Campbell, *et al.*. Performance of a prototype for a large-aperture multipass Nd: glass laser for inertial confinement fusion[J]. *Appl Opt*, 1997, 21(20): 4932—4953.
- 3 A K Potemkin, T V Barmashova, A V Kirsanov, *et al.*. Spatial filters for high-peak-power multistage laser amplifiers[J]. *Appl Opt*, 2007, 46(20): 4423—4430.
- 4 Wang Fang, Zhu Qihua, Jiang Dongbin, *et al.*. The analysis and control of self-excitation oscillation in multi-pass systems[J]. *Laser Journal*, 2005, 26(3): 19—20.
王 方, 朱启华, 蒋东滨, 等. 多程放大系统中自激振荡的分析和抑制[J]. *激光杂志*, 2005, 26(3): 19—20.
- 5 Zhang Xin, Yuan Qiang, Zhao Junpu, *et al.*. Characteristics of plasma in spatial filter pinhole of high power laser system[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(12): 2921—2924.
张 鑫, 袁 强, 赵军普, 等. 高功率激光系统空间滤波小孔等

- 离子体特性[J]. *强激光与粒子束*, 2010, 22(12): 2921—2924.
- 6 Zhang Xin, Liu Hongjie, Zhao Junpu, *et al.*. Pinhole design of spatial filter in high energy solid-state laser system[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, 47(11): 111402.
张 鑫, 刘红婕, 赵军普, 等. 高功率固体激光系统空间滤波小孔尺寸设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, 47(11): 111402.
- 7 Liu Hongjie, Jing Feng, Li Qiang, *et al.*. The effect of spatial filter pinhole on output beams quality in high power laser[J]. *Journal of Yunnan University*, 2005, 27(5A): 184—189.
刘红婕, 景 峰, 李 强, 等. 高功率固体激光装置空间滤波器小孔对输出光束质量的影响[J]. *云南大学学报*, 2005, 27(5A): 184—189.
- 8 Yanqi Gao, Baoqiang Zhu, Daizhong Liu, *et al.*. Characteristics of beam alignment in high power four-pass laser amplifier[J]. *Appl Opt*, 2009, 48(8): 1591—1597.
- 9 Yanqi Gao, Baoqiang Zhu, Daizhong Liu, *et al.*. Influences of the alignment and misalignment spatial filters on the beam quality in high power laser systems[J]. *J Opt*, 2010, 12(9): 095704.
- 10 Thomas D Rahmlow. Rugate Filter Having Suppressed Harmonics[P]. United States Patent: 5523882, [1996-6-4].
- 11 T D Rahmlow, A Turner. Broadband Rugate Filter: United States Patent, 5475531[P]. 1995-12-12.
- 12 W J Gunning. Rugate Filter Incorporating Parallel and Series Addition: United States Patent, 4952025[P]. 1990-8-28.
- 13 N P Murarka, K J Kogler, C S Bartholomew, *et al.*. Rugate Optical Filter Systems [P]. United States Patent: 4837044, [1989-6-6].
- 14 A C V Popta, M M Hawkeye, J C Sit, *et al.*. Gradient-index narrow-bandpass filter fabricated with glancing-angle deposition [J]. *Opt Lett*, 2004, 29(21): 2545—2547.
- 15 K Robbie, G Beydaghyan, T Brown, *et al.*. Ultrahigh vacuum glancing angle deposition system for thin films with controlled three-dimensional nanoscale structure [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2004, 75(4): 1089—1097.
- 16 R Leitel, O Stenzel, S Wilbrandt, *et al.*. Fabrication and characterization of rugate structures composed of SiO_2 and Nb_2O_5 [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2005, 13(4): 505—511.
- 17 T K L Wong, L Brzozowski, E H Sargent. Analysis of non-quarter-wave grating by a modified Fourier-transform method[J]. *Appl Opt*, 2002, 41(32): 6763—6767.
- 18 F A Rios, F V Villa, J A G Armenta. Dichroic Rugate filters [J]. *Appl Opt*, 2006, 45(3): 495—500.
- 19 K Robbie, G Beydaghyan, T Brown, *et al.*. Ultrahigh vacuum glancing angle deposition system for thin films with controlled three-dimensional nanoscale structure [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2004, 75(4): 1089—1097.
- 20 Zheng Guangwei. Study on Non-Focusing Low-Pass Spatial Filtering Technology for High-Power Laser Beam [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011. 144—147.
郑光威. 高功率激光非聚焦型空间低通滤波技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2011. 144—147.
- 21 M G Moharam, T K Gaylord. Chain-matrix analysis of arbitrary-thickness dielectric reflection gratings[J]. *J Opt Soc Am*, 1982, 72(2): 187—190.

栏目编辑:张浩佳