

# 基于体全息光栅的光学相控阵放大级设计

段佳著 赵祥杰 张大勇\*

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要** 为了扩展光学相控阵的角度扫描范围,设计了基于体全息光栅的放大级,研究了光栅结构参数及其制作误差对性能的影响规律,提出了容差优化方法。研究表明:光栅厚度和折射率调制是主要影响衍射效率的参数,光栅周期和光栅厚度是影响角度选择性的主要参数。光栅出入射角由光栅周期和光栅矢量倾斜角决定,在保持角放大率不变时,可以通过在出入射面内旋转介质调节这两个参数。实际制作中,光栅周期误差和光栅矢量倾斜角误差会导致衍射角偏离设计值,读出光波长越长,光栅周期误差的影响越小;光栅后面介质折射率越高,光栅矢量倾斜角误差影响越小。增加光栅厚度设计值可以减小光栅厚度误差对衍射效率的影响,而减小光栅厚度设计值可以减小折射率调制误差对衍射效率的影响,实际制备时,需结合系统需求进行综合设计。

**关键词** 光学器件;放大级;体全息光栅;角度放大器;光学相控阵

**中图分类号** O436.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0405002

## Design of Optical Phased Arrays Amplifier Stage Based on Volume Holographic Grating

Duan Jiazhu Zhao Xiangjie Zhang Dayong

(Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

**Abstract** To enlarge the steering range of optical phased array, volume holographic grating is employed to act as amplifier stage. The influence of structure parameters and fabrication errors on the performance of grating is studied, and tolerance optimization is proposed to reduce the influence. The results show that grating thickness and refractive index modulation are main parameters that affect diffraction efficiency; grating period and thickness are main parameters that affect angular selectivity. Bragg angle and diffraction angle are determined by grating period and grating vector slant angle, which can be adjusted by rotating medium in the incident and diffraction plane if the angular magnification keeps unchanged. In fabrication process, grating period error and grating vector slant angle error will make diffraction angle diverging design value. The longer readout beam wavelength is, the less impact grating period error has; the higher medium refractive index behind grating is, the less impact grating vector slant angle error has. Increasing grating thickness design value can reduce the impact of grating thickness error on diffraction efficiency, while reducing grating thickness design value can reduce the impact of refractive index modulation error on diffraction efficiency, so it's necessary to combine with the optical phased array system's requirements to make integrated design.

**Key words** optical devices; amplifier stage; volume holographic grating; angular amplifier; optical phased arrays

**OCIS codes** 050.1590; 050.7330; 090.1970; 090.2890

## 1 引言

光学相控阵(OPA)技术作为一种实现任意方

向光束指向的非机械控制方式,具有不受机械传动影响、分辨率高、扫描速度快、体积小、成本低、抗干

**收稿日期**: 2013-08-19; **收到修改稿日期**: 2013-12-03

**基金项目**: 国家自然科学基金(61378095)、中国工程物理研究院科技发展基金(2012B0401055)、流体物理研究所发展基金(SFZ20120304)

**作者简介**: 段佳著(1989—),男,硕士,主要从事新型光学器件方面的研究。E-mail: jzduan\_oe@163.com

**导师简介**: 张大勇(1975—),男,博士,研究员,主要从事液晶光学和激光与物质相互作用方面的研究。

E-mail: zdywxl874@sohu.com

扰和保密性强等优点<sup>[1]</sup>,是下一代光电系统迫切需要的光束方向控制方式。但是,受到各种因素的制约,目前光学相控阵的光束角度偏转能力有限<sup>[2]</sup>,这极大地限制了光学相控阵技术的应用,需要使用放大级器件进一步扩展扫描范围。在放大级的实现方案中,基于多路复用透射式体全息光栅(VHG)的方案具有衍射效率高、可复写全息图且引入损耗小、角度控制范围大、散射和吸收损耗小、可处理高能量等一系列优点,可被用作光学相控阵系统的放大级器件<sup>[3]</sup>。2007年,Smith等<sup>[4]</sup>申请的专利中,利用Raytheon模型证明了这种方式不仅可以具有±45°范围的角度控制能力,还可以控制光的两种偏振态。

国内外对体全息光栅进行的研究,理论方面有Kogelnik耦合波理论<sup>[5]</sup>、严格耦合波理论<sup>[6]</sup>、二维耦合波理论<sup>[7]</sup>、三维耦合波理论<sup>[8-9]</sup>、局域体全息理论<sup>[10]</sup>等,还有光栅边界<sup>[11]</sup>、实际光束<sup>[12]</sup>等实际因素对输出性能影响方面的讨论,实验研究涉及了不同体全息光栅材料<sup>[13-16]</sup>以及制作工艺<sup>[17-19]</sup>等方面,但是,这些研究大多用于高密度存储<sup>[20-22]</sup>、波分复用<sup>[23]</sup>等领域,对体全息光栅在光束偏转领域的研究较少<sup>[24]</sup>,更缺乏针对光学相控阵应用的参数设计方面研究。因此,开展基于透射式体全息光栅的角度放大器这种关键器件用作光学相控阵放大级的研究,对于光学相控阵的进一步发展意义重大。本文根据Kogelnik耦合波理论,系统总结了光栅的结构参数对性能的影响规律,并根据光学相控阵的实际情况,针对实际制作和使用中可能出现的误差进行了分析,提出了容差优化方法,对于光学相控阵放大级的设计、制作和使用具有指导意义。

## 2 设计理论

光学相控阵的角度扩展方案如图1所示,对于期望获得的大扫描范围,可以划分为若干子角度范围,每个子角度范围都在相控阵的偏转能力之内,然后利用放大级,把对角度的控制和扩展分为两步:1)使用放大级器件将第一级寻址相控阵的输出光束偏转到每个子角度范围内;2)使用放大级之后的精调相控阵对这个子角度范围内的光束进行精细控制和填充,最终实现大角度范围内的准连续光束角度控制。

假设一块介质中复写了 $N$ 路VHG,其Bragg入射角角分别为 $\theta_{i,1}, \theta_{i,2}, \dots, \theta_{i,N}$ ,对应的衍射角分别为 $\theta_{d,1}, \theta_{d,2}, \dots, \theta_{d,N}$ ,定义相对角放大率

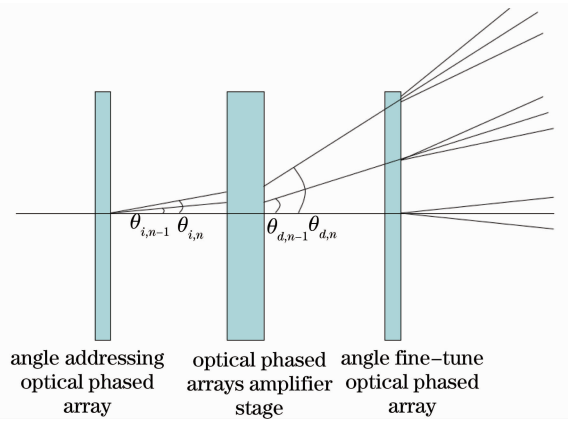


图1 光学相控阵角度扩展原理图

Fig. 1 Optical phased array angle extension principle

$$M_r(n-1) = \frac{\theta_{d,n} - \theta_{d,n-1}}{\theta_{i,n} - \theta_{i,n-1}}, \quad n = 2, 3, \dots, N. \quad (1)$$

由(1)式可以看出,只要相邻两路VHG的衍射角间隔大于入射角间隔,便实现了角度放大的功能,因此,设计体全息光栅使得出入射角满足这样的条件,一块复写了 $N$ 路VHG的多路复用角度放大器就可以用作光学相控阵系统的放大级,实现相控阵系统扫描角度的扩展。基于这个原理,光学相控阵放大级的设计主要就是对多路复用放大器中的每一路VHG进行设计,并解决各路VHG之间的相互干扰问题。对于每一路VHG的设计,Kogelnik耦合波理论<sup>[6]</sup>从麦克斯韦方程组出发,根据记录介质在有调制情况下的电学或光学常数,可以推导出耦合波方程组

$$\begin{aligned} R'' - 2j\rho_z R' - 2j\alpha\beta R + 2\kappa\beta S &= 0, \\ S'' - 2j\sigma_z S' - 2j\alpha\beta S + (\beta^2 - \sigma^2)S + 2\kappa\beta R &= 0, \end{aligned} \quad (2)$$

式中 $\alpha$ 为吸收常数, $\beta = 2\pi n/\lambda$ 为传播常数, $\kappa = \pi\Delta n/\lambda - j\Delta\alpha/2$ 为耦合常数,光栅常数 $K = 2\pi/\Lambda$ , $R$ 为参考波, $S$ 为参考波与光栅相互作用产生的衍射信号波,如果假设 $R$ 和 $S$ 之间的能量交换很慢,所有能量的吸收也很慢(慢变近似条件),那么可以忽略 $R''$ 和 $S''$ ,波矢 $\rho$ 和 $\sigma$ 包含有传播常数和波的传播方向的信息,如图2所示,参考波波矢 $\rho$ 、信号波波矢 $\sigma$ 与光栅矢量 $K$ 的关系为

$$\sigma = \rho - K, \quad (4)$$

式中

$$\rho = \beta(\sin \theta \quad 0 \quad \cos \theta)^T, \quad (5)$$

$$K = K(\sin \phi \quad 0 \quad \cos \phi)^T. \quad (6)$$

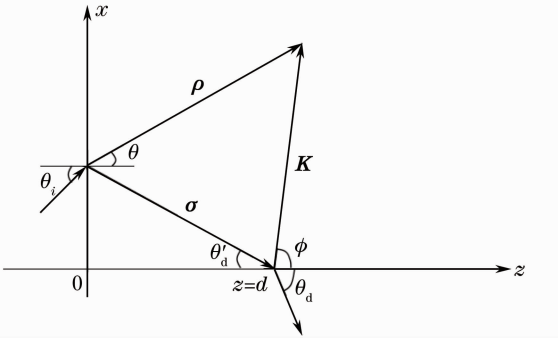


图2 透射式光栅中波矢关系示意图

Fig. 2 Wavevector relationship in transmission grating

式中  $\theta_i$  为参考光的入射角,  $\theta$  为参考光在光栅中的入射角,  $\theta'_d$  为信号光的衍射角,  $\theta_d$  为信号光的出射角, 角度之间满足折射率定律

$$\begin{cases} n_{\text{out}} \sin \theta_i = n_0 \sin \theta \\ n_0 \sin \theta'_d = n_{\text{out}} \sin \theta_d \end{cases}, \quad (7)$$

式中  $n_{\text{out}}$  为光栅外的介质折射率,  $n_0$  为光栅介质的折射率。

对于透射式体全息光栅, 边界条件为

$$R(0) = 1, \quad S(0) = 0. \quad (8)$$

由(2)~(4)式, 在慢变近似条件下可以求解出光栅中波的振幅

$$S = -j \left( \frac{c_R}{c_S} \right)^{1/2} \exp \left( -\frac{\alpha d}{c_R} + \xi \right) \times \sin(\gamma^2 - \xi^2)^{1/2} / \left( 1 - \frac{\xi^2}{\gamma^2} \right)^{1/2}, \quad (9)$$

式中  $\gamma = \frac{\kappa d}{\sqrt{c_R c_S}}$ ,  $\xi = \frac{d}{2} \left( \frac{\alpha}{c_R} - \frac{\alpha}{c_S} - j \frac{\vartheta}{c_S} \right)$ ,  $d$  为光栅厚度, 倾斜因子  $c_R = \rho_z / \beta = \cos \theta$ ,  $c_S = \sigma_z / \beta = \cos \theta - K \cos \phi / \beta$ , 相移因子  $\vartheta \equiv (\beta^2 - \sigma^2) / 2\beta = K \cos(\phi - \theta) - K^2 \lambda / 4\pi n_0$ . 衍射效率  $\eta$  定义为

$$\eta = \frac{|c_S|}{c_R} |SS^*|. \quad (10)$$

在角度放大器材料(折射率为  $n_0$ , 吸收系数  $\alpha$ )、出入射角设计要求给定的情况下, 介质厚度  $d$ 、光栅周期  $\Lambda$ 、光栅矢量倾斜角  $\phi$ 、折射率调制度  $\Delta n$  决定了一个光栅的结构参数(需要说明的是, 当两束写入光的相干区域在  $z$  方向覆盖整个介质的厚度时, 介质厚度与光栅厚度相等, 本文中不加说明处都是这种情况)。对于一个给定的光栅, 只有读出光的波长为设计的中心波长  $\lambda_0$ , 并且以布拉格角  $\theta_B$  对应的布拉格入射角入射到光栅介质表面时, 才能满足布拉格条件, 衍射效率达到最大值  $\eta_{\text{max}}$ ; 当入射波长或者入射角出现偏离时, 动量匹配条件不满足, 衍射效率会下降。光栅的布拉格条件为

$$\cos(\phi - \theta) = \frac{K}{2\beta}. \quad (11)$$

如果当入射角固定, 入射波长  $\lambda$  相对中心波长  $\lambda_0$  偏离量为  $\Delta\lambda_{1/2}$  时, 或者当入射光波长固定, 入射角  $\theta$  相对布拉格入射角  $\theta_B$  偏离量为  $\Delta\theta_{1/2}$  时, 衍射效率从最大值单调地下降为零, 那么可以用波长选择半宽  $\Delta\lambda_{1/2}$  和角度选择半宽  $\Delta\theta_{1/2}$  来表征光栅的波长选择性和角度选择性。

在进行光栅结构参数的设计时, 根据设计要求给定的出入射角, 联立动量匹配关系(4)和布拉格条件(11), 结合(5)~(7)式, 可以求解出光栅周期  $\Lambda$  和光栅矢量倾斜角  $\phi$ , 进一步的, 按照寻址相控阵的角度选择性要求, 以及光学相控阵系统对放大级的效率、尺寸等要求, 可以进行介质厚度  $d$  和折射率调制度  $\Delta n$  的设计和优化。

### 3 多路复用角度放大器的设计和优化

#### 3.1 光栅参数对输出性能的影响

透射式体全息光栅用于光学相控阵放大级时, 如果不考虑变波长读出, 在满足体光栅的波长选择范围远远大于激光器波长波动范围的前提下, 放大级的主要性能指标为衍射效率和角度选择性。

每个光栅参数都会对衍射效率和角度选择性产生影响, 为了找到某个光栅参数的单独影响规律, 固定其他参数作为已知条件, 只改变期望参数来观察规律。图3中, 第1组选取的已知条件参数可以达到最高衍射效率, 为了排除已知条件参数选取的特殊性, 同时模拟了其他3组已知条件参数条件下的曲线, 这3组已知条件参数分别在第1组已知条件的基础上变动(光栅矢量倾斜角变大、光栅厚度增加、折射率调制度增大)。由图3(a)所示, 在保证入射角始终满足布拉格条件的情况下, 随着光栅周期增大, 光栅能够获得的最大衍射效率达到饱和后便不再增加; 对比不同曲线可知, 其他已知条件参数的取值也会影响饱和衍射效率的高低, 后文将继续讨论每一个光栅参数的影响规律。通过计算衍射效率从最高点单调下降到最低点的角度间隔, 可以模拟光栅的角度选择性曲线, 由图3(b)可知, 角度选择半宽随光栅周期的增大而线性增加; 对比不同光栅的角度选择性曲线可知, 光栅矢量倾斜角的增加导致角度选择半宽略有增加, 而光栅厚度、折射率调制度的增加都会导致角度选择半宽减小。总之, 光栅周期主要会影响角度选择半宽, 光栅周期  $\Lambda$  越小, 则角度选择半宽越小, 一方面, 这样可以减小相邻

VHG 之间的相互影响,在相控阵角度寻址范围一定的情况下增加寻址个数,另一方面,光栅周期小也会使得制作精度要求提高,并对寻址相控阵的角度寻址精度提出更高的要求。

由图 4(a)可知,在保证入射角始终满足布拉格条件的情况下,光栅矢量倾斜角  $\phi$  对输出光衍射效

率的影响较小,但是其他已知条件参数的取值同样会影响整体衍射效率的高低。由图 4(b),角度选择半宽  $\phi$  的增大近似线性增加,但是总体上来看,曲线的斜率较小,光栅矢量倾斜角变化引起的角度选择半宽的变动相对较小。

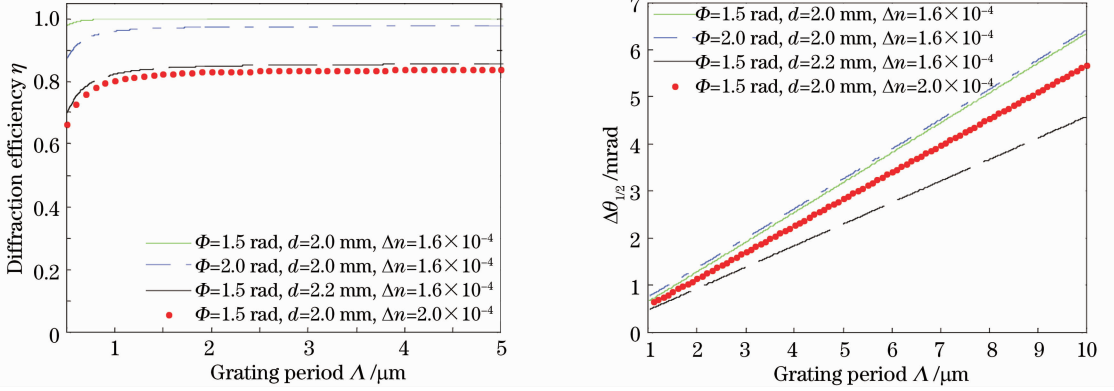


图 3 (a) 衍射效率和(b)角度选择半宽与光栅周期的关系

Fig. 3 (a) Efficiency of gratings and (b) angular selectivity as a function of grating period

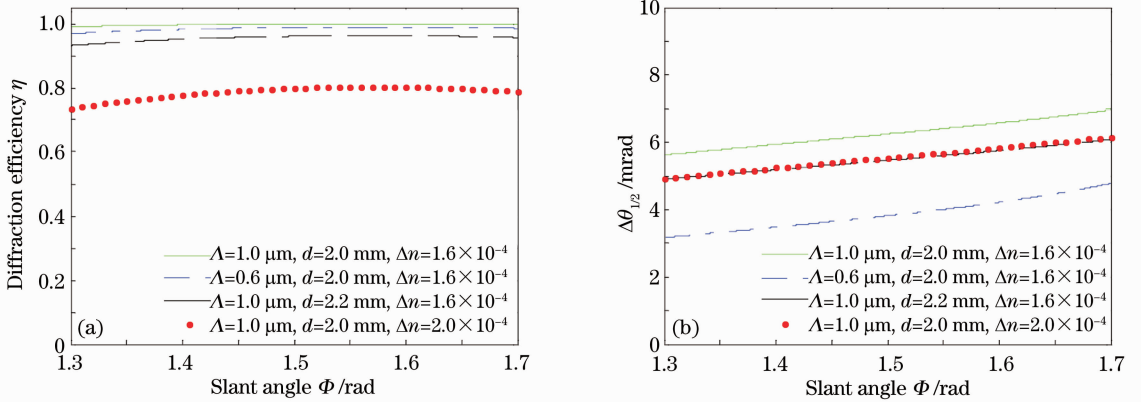


图 4 (a) 衍射效率和(b)角度选择半宽与光栅矢量倾斜角的关系

Fig. 4 (a) Efficiency of gratings and (b) angular selectivity as a function of grating vector slant angle

从图 5(a)可知,衍射效率随光栅厚度呈现先增大再减小的振荡趋势,这是由于在光栅中,参考波受到光栅的耦合作用产生了信号波,沿着光栅厚度方向,伴随着参考波和信号波之间能量不断交换的过程:参考波的能量先耦合进入衍射波中,衍射效率增加;当达到最大值以后,信号波的能量又耦合进参考波中,于是衍射效率下降。因此,衍射效率随厚度增加出现了振荡现象。对比折射率调制度不同的光栅衍射效率曲线可知,折射率调制度越大,衍射效率达到最大所需要的光栅厚度越小,但是同时衍射效率曲线更为陡峭,衍射效率对光栅厚度的变化更加敏感。由图 5(b)可以看出,角度选择半宽随着光栅厚

度的增加而下降,并且下降的速度随着折射率调制度的增加而加快。

由图 6(a)可知,衍射效率随折射率调制度也呈现先增大再减小的振荡趋势,并且光栅厚度越大,衍射效率达到最大所需要的折射率调制度越小。由图 6(b)可以看出,角度选择半宽随着折射率调制度的增加出现如图所示的规律,对比三条曲线可知,光栅厚度大的光栅,整体上角度选择半宽更小。实际制作中,折射率调制度是依靠实时监测来定性控制的,由以上分析可知,制作过程中折射率调制度的控制不仅影响到最终衍射效率的大小,还会对角度放大器的角度选择半宽产生影响。



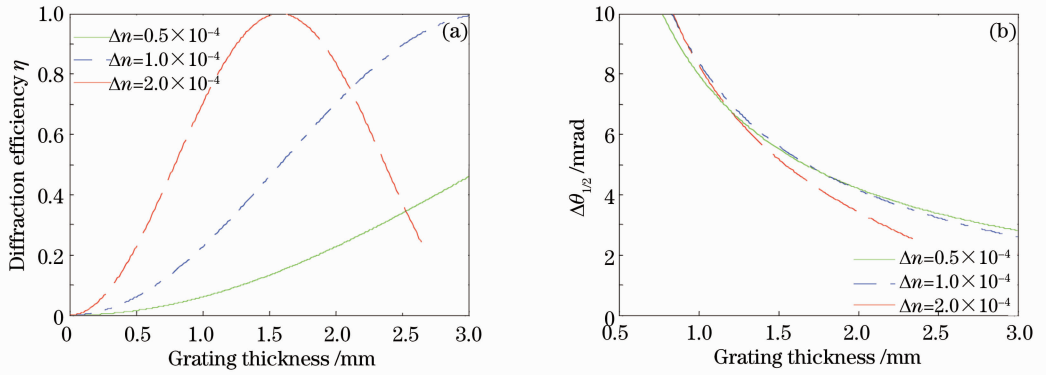


图 5 不同折射率调制度下, (a) 衍射效率和 (b) 角度选择半宽和厚度的关系

Fig. 5 Under different refractive index modulations, (a) efficiency of gratings and (b) angular selectivity as a function of grating thickness

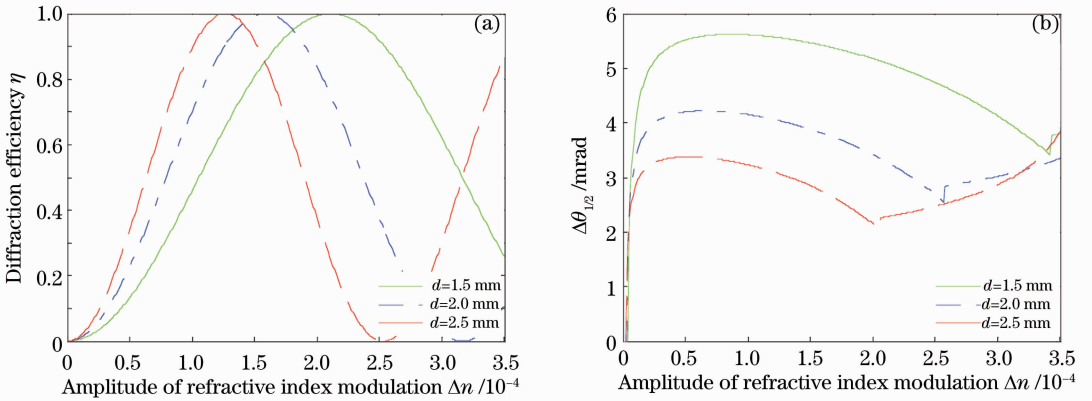


图 6 不同厚度的光栅中, (a) 衍射效率和 (b) 角度选择半宽和折射率调制度的关系

Fig. 6 Gratings with different thicknesses, (a) efficiency of gratings and (b) angular selectivity as a function of refractive index modulation

### 3.2 光栅参数的优化设计

为了获得光学相控阵需要的衍射效率和角度选择性指标,需要对各个光栅参数进行调节和优化。根据布拉格条件和动量匹配关系,光栅周期和光栅矢量倾斜角可以通过设计出入射角的分布进行调节,但是,用作光学相控阵的放大级时,出入射角的设计值受到第一级寻址相控阵角度偏转范围的限制,按照计算得到的参数制作放大级可能会使各路 VHG 之间产生相互的干扰,特别是出入射光夹角较小时,计算得到的光栅周期值较大,根据图 3(b),这会使得体光栅的角度选择半宽值较大,在多路复用的角度间隔受限的情况下,角度选择半宽过大不仅会加重各路 VHG 之间的串扰,更不利于复用路数的增加。为了在更大范围调节光栅周期和光栅矢量倾斜角,可以在出入射方向不变,即保持角放大率不变的情况下,通过在出入射面内将介质旋转一定的角度来实现调节范围的增大。

假设介质旋转之前,入射角初始值  $\theta_i$ , 出射角初

始值  $\theta_d$ , 如果介质旋转  $\theta_0$ , 则入射角变为  $\theta_i - \theta_0$ , 出射角变为  $\theta_d - \theta_0$ 。如图 7 和图 8, 数值模拟了光栅周期、光栅矢量倾斜角与介质旋转角度的关系曲线。从图 7(a) 和图 8(a) 可以看出, 介质表面法线从  $-1$  rad 旋转到  $1$  rad 的过程中, 计算得到的光栅周期呈现先减小后增加的趋势; 对比出入射角初始值不同的 VHG 曲线, 出入射光夹角越大的光栅, 光栅周期越小。从图 7(b) 和图 8(b) 可以看出, 光栅矢量倾斜角  $\phi$  与介质表面法线旋转角有近似线性的关系, 并且对比 (a)、(b) 两图可知, 当通过旋转介质的方法获得光栅周期的局部最小值时,  $\phi$  的取值等于  $\pi/2$ 。因此, 可以通过控制介质的旋转角度来调节光栅周期和光栅矢量倾斜角的值, 在出入射角初始值受限的情况下扩展光栅参数的调节范围, 从而达到优化光栅输出性能的目的。对于透射式体全息光栅, 入射光和出射光分别位于光栅的两面, 因此, 介质表面法线的旋转角要保证介质前表面不越过入射光方向, 后表面不越过出射光方向, 则转动范围为  $\left[-\frac{\pi}{2} + |\theta_i|, \frac{\pi}{2} - |\theta_d|\right]$ 。

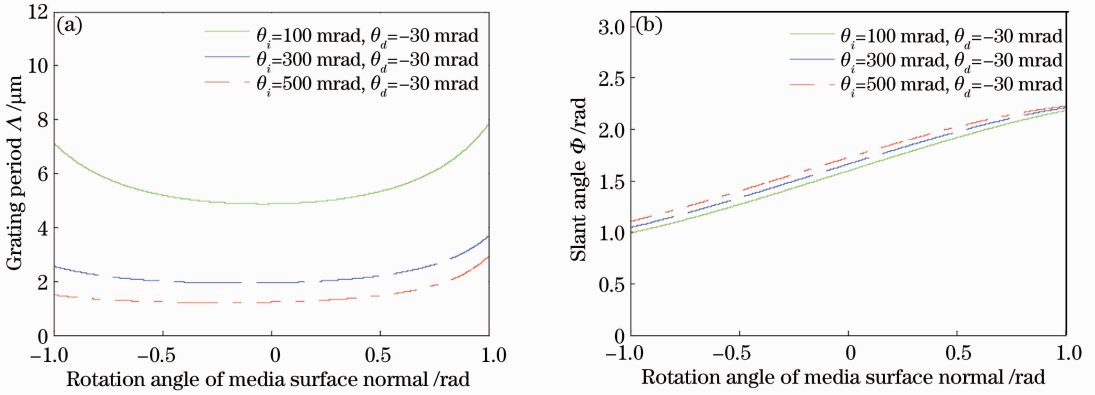


图 7 入射角初始值不同, (a)光栅周期和(b)光栅矢量倾斜角与介质表面法线旋转角度的关系

Fig. 7 Different initial incident angles, (a) grating period and (b) slant angle as a function of rotation angle of media surface normal

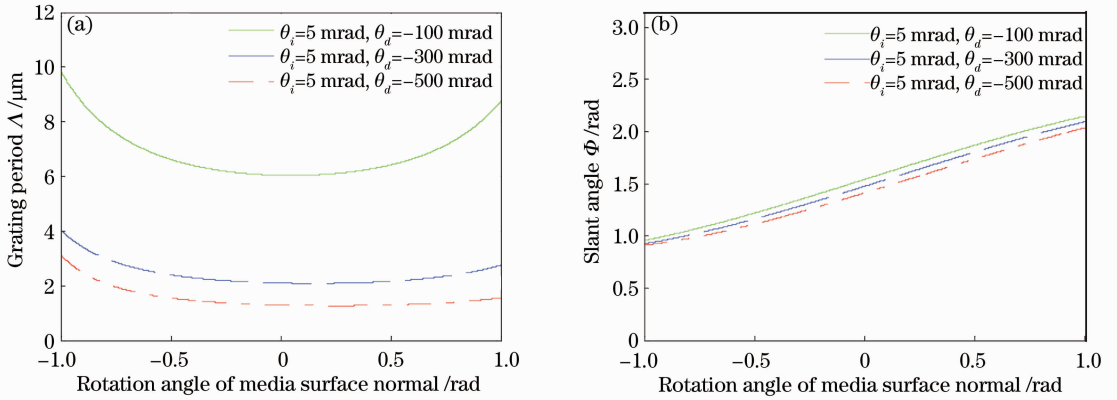


图 8 出射角初始值不同, (a)光栅周期和(b)光栅矢量倾斜角与介质表面法线旋转角度的关系

Fig. 8 Different initial departure angles, (a) grating period and (b) slant angle as a function of rotation angle of media surface normal

当光学相控阵确定了多路复用角度放大器中每路 VHG 需要的出入射角要求以后,通过上述的优化设计过程,光栅周期和光栅矢量倾斜角即可确定,进一步地,需要设计光栅厚度  $d$  和折射率调制度  $\Delta n$ 。由前文得出的规律可知,如果想要获得一定的衍射效率或者角度选择半宽指标,光栅厚度  $d$  和折射率调制度  $\Delta n$  存在对应的组合关系,根据应用场合的不同,这两个参数主要有以下几种考虑:1) 折射率调制度  $\Delta n$  尽可能小,以获得更多的复用路数;2) 介质厚度尽可能小,以降低损耗,减小光线走离角,提高栅线在厚度方向的均匀性;3) 衍射效率尽可能高,提高能量传输效率;4) 针对一定厚度的介质,设计各路 VHG 的最佳折射率调制度。

如图 9 所示,假定设计要求为入射角  $55 \text{ mrad}$ 、出射角  $50 \text{ mrad}$ ,在得到光栅周期和光栅矢量倾斜角后,数值模拟了衍射效率与  $d$ 、 $\Delta n$  的关系,根据此图,结合衍射效率要求,可以找出上述四种应用要求

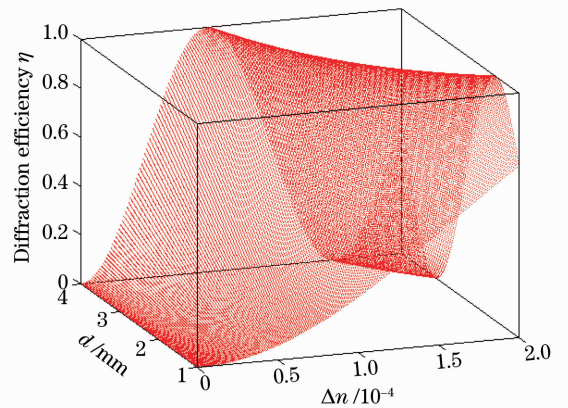


图 9 衍射效率与光栅厚度、折射率调制度的关系  
Fig. 9 Efficiency of gratings as a function of grating thickness and refractive index modulation

对应的  $d$  和  $\Delta n$ 。从图中可以看出,随着厚度和折射率调制度的增加,衍射效率出现振荡趋势,但实际中折射率调制度和光栅厚度都存在一定的调节范围,

在这个范围内,要达到要求的高衍射效率,如果光栅厚度取值最小,所需的折射率调制度较大,而如果折射率调制度取值最小,需要的光栅厚度较大。

其中,根据四种应用场合要求得到的参数如表 1 所示,对应四种应用场合,折射率调制度和介质厚度都能找到满足相应场合设计要求的取值,但由于参数的不同,角度选择半宽和波长选择半宽有所差异,符合前文所述的各光栅参数对输出性能的影响规律,在实际的应用中,可根据设计要求的侧重点进行相应的优化设计。

表 1 根据四种应用场合的要求进行设计的结构参数和性能参数

Table 1 Structural parameters and performance parameter designed for four applicable situations

	$\Delta n_{\min}$	$d_{\min}$	$\eta_{\max}$	$d_{\text{fixed}}$
$d / \text{mm}$	2.99	0.78	0.95	2
$\Delta n / 10^{-4}$	1.04	4.0	3.33	1.58
$\Delta \theta / \text{mrad}$	2.57	9.85	8.04	3.82
$\Delta \lambda / \text{nm}$	31.4	124.0	100.5	46.9

表 2 放大级中三路 VHG 的设计值

Table 2 Designed value of three VHG in amplifier

	$\Lambda / \mu\text{m}$	$\phi / \text{rad}$	$d / \text{mm}$	$\Delta n / 10^{-4}$
VHG1; $\theta_i = 205 \text{ mrad}, \theta_o = -100 \text{ mrad}$	2.09	1.61	2	1.58
VHG2; $\theta_i = 210 \text{ mrad}, \theta_o = -150 \text{ mrad}$	1.80	1.59	2	1.58
VHG3; $\theta_i = 215 \text{ mrad}, \theta_o = -200 \text{ mrad}$	1.57	1.57	2	1.58

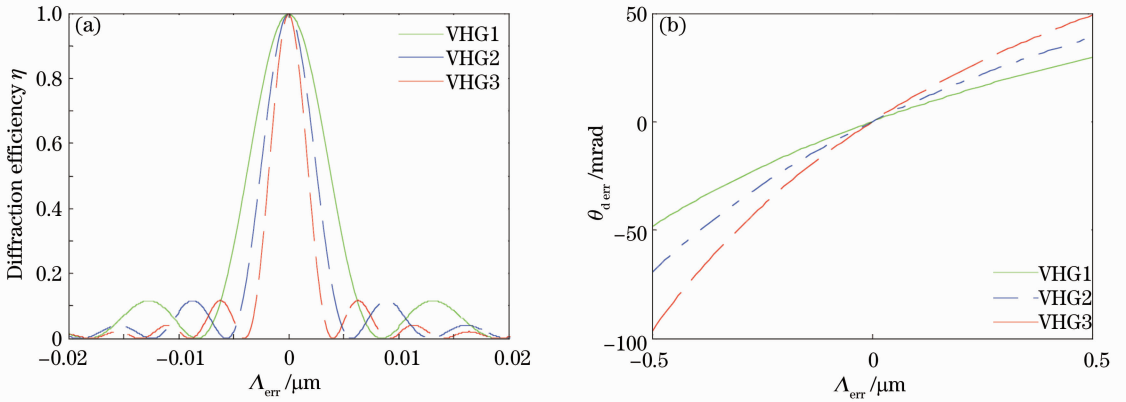


图 10 (a)衍射效率和(b)衍射角度误差与光栅周期误差的关系曲线

Fig. 10 (a) Efficiency of gratings and (b) diffraction angle error as a function of grating period error

同样的,由布拉格条件,在光栅周期不变的情况下,光栅矢量倾斜角的误差也会导致布拉格角的变化。同光栅周期误差曲线的变化规律一样,如果入射光仍在设定的原布拉格入射角入射,衍射效率随着写入光夹角误差的增加将会极大地减小,只有当

## 4 误差分析和优化

在多路复用角度放大器的制作过程中,光栅周期、矢量倾斜角、光栅厚度和折射率调制度都会有误差,各项参数的容差范围可以根据实际需求来确定。假设角度放大器各路 VHG 的入射角间隔 5 mrad,出射角间隔 50 mrad,介质表面法线旋转 200 mrad,其中三路 VHG 的设计参数如表 2 所示。

### 4.1 光栅参数误差对输出性能的影响

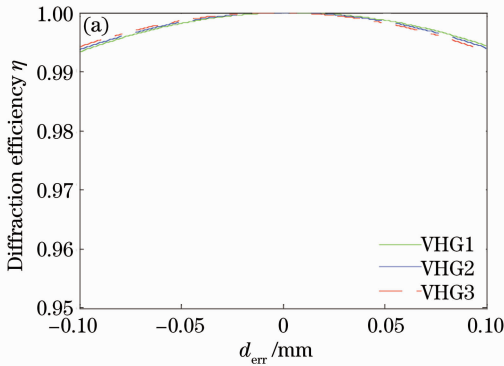
光栅周期误差是由写入光夹角误差引起的,由布拉格条件(11)式可知,在光栅矢量倾斜角不变的情况下,光栅的布拉格角会改变。如图 10(a)所示,如果入射光仍在设定的布拉格入射角入射,衍射效率随着光栅周期误差的增加将会极大地降低,并且出入射角夹角值越大的 VHG 的误差曲线越陡峭,衍射效率对光栅周期误差越敏感。由于布拉格角的变化,只有当寻址相控阵的光偏转到新的布拉格入射角,才能达到期望的衍射效率,这是布拉格入射角位置发生移动的后果。如图 10(b)所示,光栅周期误差使得出射光角度发生改变,并且光栅周期偏小所造成的衍射角度误差更加严重。

寻址相控阵的输出光偏转到新的布拉格入射角,衍射效率才能达到最大。同时,光栅矢量倾斜角误差也会引起衍射角的误差。

光栅厚度误差是由于切割误差或者温度、湿度变化引起的介质体积变化等因素造成的。由图 11(a)中

可以看出,光栅厚度误差会使衍射效率有一定的下降,三路 VHG 的厚度误差曲线相差不大。

折射率调制度与写入过程中的光强和曝光时间有关,光强越强,曝光时间越长,折射率调制度越大。



由图 11(b)可以看出,较小的折射率调制度误差也会对输出光的衍射效率产生较大的影响,曝光时间控制不精确或者写入光强不稳定所造成的折射率调制度误差,都会造成衍射效率的下降。

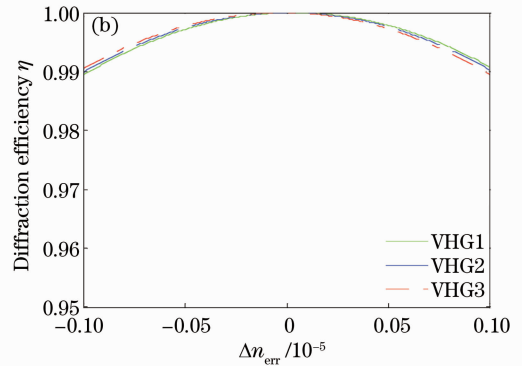


图 11 衍射效率与(a)光栅厚度误差和(b)折射率调制度误差的关系曲线

Fig. 11 Efficiency of gratings as a function of (a) grating thickness error and (b) refractive index modulation error

#### 4.2 容差优化

对于光栅周期误差引起的出射角的偏离,如图 12所示,读出光波长越大,光栅周期误差曲线越平坦,说明输出角度偏移量对光栅周期误差的敏感度越低。另外,从图 3(b)可知,在更大的厚度或者更大的折射率调制度下,角度选择半宽与光栅周期的关系曲线的斜率会减小,也就是光栅周期误差对角度选择半宽造成的影响会减小。

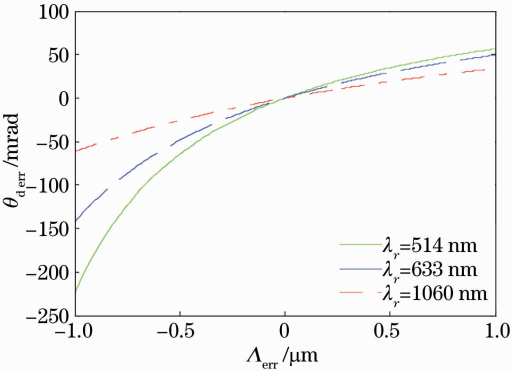
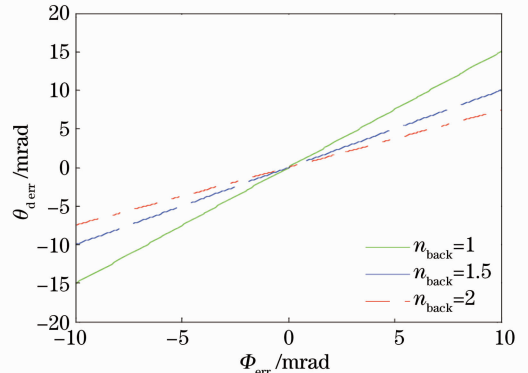


图 12 衍射角度误差与光栅周期误差的关系曲线

Fig. 12 Diffraction angle error as a function of grating period error

图 13 衍射角度误差与光栅矢量倾斜角误差的关系曲线  
Fig. 13 Diffraction angle error as a function of slant angle error

不同大小的角度选择半宽,其相对误差是不同的,因此,如果光栅性能对倾斜角误差比较敏感,应该尽量将角度选择半宽设计大一些,以降低角度选择半宽的相对误差。

对于光栅矢量倾斜角误差引起的出射角的偏离,如图 13 所示,应该设法使光栅后面衍射光所处的空间的折射率尽可能大,比如在光栅后浸油,由于油的折射率比空气折射率大,可以起到降低出射角偏离的效果。另外,由图 4(b)可知,改变其他光栅参数,角度选择半宽与光栅矢量倾斜角关系曲线的斜率不变,即相同的倾斜角误差都会造成同样大小的角度选择半宽误差,但是,同样的绝对误差,对于

光栅厚度误差会影响衍射效率和角度选择半宽,特别是在一些皱缩系数较大的有机感光材料中,厚度误差的影响会更为严重。由图 14 可知,厚度较大的光栅对于厚度误差的敏感程度更低;另外,要达到高衍射效率,厚度越大的光栅,需要的折射率调制度越小,结合图 5(b)可知,这种光栅的角度选择半宽曲线也更为平坦,即厚度误差对角度选择半宽的影响也更小。因此,优化厚度容差,可以使用厚度大的介质制作光栅。

由于折射率调制度一般只能靠实时监控衍射效率来控制,没有一个更精确的定量控制方式,因此其误差很难控制,但是可以通过重复试验得到最佳的



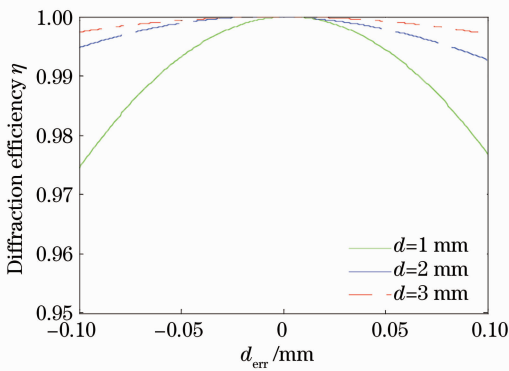


图 14 衍射效率与介质厚度误差的关系曲线  
Fig. 14 Efficiency as a function of grating thickness error

曝光时间经验数据来提高控制精度。由图 15 可知,光栅厚度越小,折射率调制度误差曲线越平坦,说明衍射效率对折射率调制度的敏感度降低,因此,优化折射率调制度容差,可以选用厚度较小的材料。

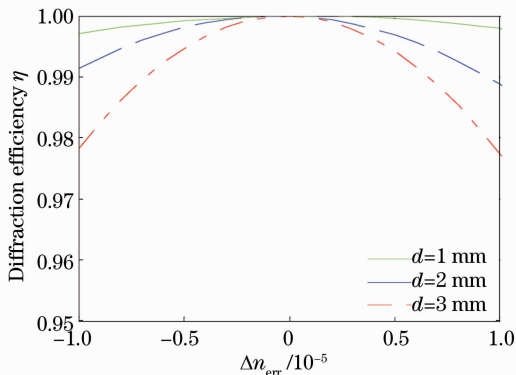


图 15 衍射效率与折射率调制度误差的关系曲线  
Fig. 15 Efficiency as a function of refractive index modulation error

## 5 结 论

针对光学相控阵扩展扫描范围的需求,对用作放大级的多路复用角度放大器进行了设计和优化。通过模拟各结构参数对 VHG 输出性能的影响,总结了结构参数对输出指标的影响规律,并根据光学相控阵的实际需要和实际制作过程中可能出现的误差,分析了各种误差的影响,提出了优化方法。研究表明:1)影响衍射效率的光栅参数主要是光栅厚度和折射率调制度,要达到高衍射效率,光栅厚度越大则需要的折射率调制度越小,折射率调制度越大则需要的光栅厚度越小;2)对角度选择半宽影响显著的是光栅周期和光栅厚度,角度选择半宽与光栅周期正相关,与光栅厚度负相关;3)光栅周期和光栅矢量倾斜角的调整范围受到寻址相控阵扫描角度

的限制,在保持角放大率不变时,可以通过在出入射面内将介质旋转一定的角度来实现这两个参数调整范围的扩展;4)光栅周期误差会改变布拉格入射角,使得衍射光角度发生改变,并且光栅周期偏小所造成的衍射角度误差更加严重,而读出光波长越长,光栅周期误差的影响越小,降低光栅周期误差对角度选择半宽的影响,可以增加光栅厚度或者增大折射率调制度;5)要降低光栅矢量倾斜角误差造成的衍射角度误差,应该设法使光栅后面衍射光所处的空间的折射率尽可能大,要降低光栅矢量倾斜角误差引起的角度选择半宽相对误差,应该尽量将角度选择半宽设计值增大;6)减小光栅厚度误差和折射率调制度误差对衍射效率的影响,需要光栅厚度向相反方向调整,即优化厚度容差需要增大光栅厚度设计值,而优化折射率调制度容差需要减小光栅厚度设计值,因此需要综合比较厚度误差和折射率调制度误差的严重程度和误差控制难度,并结合光学相控阵系统的性能要求进行综合设计。

## 参 考 文 献

- 1 P F Mcmanamon, P J Bos, M J Escuti, *et al.*. A review of phased array steering for narrow-band electrooptical systems [C]. Proc of IEEE, 2009, 97(6): 1078–1096.
- 2 Zhao Xiangjie, Liu Cangli, Zhang Dayong, *et al.*. Numerical analysis of liquid crystal optical phased array with optimized diffraction efficiency [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(11): 1123002.  
赵祥杰, 刘仓理, 张大勇, 等. 液晶相控阵衍射效率的优化分析 [J]. 光学学报, 2013, 33(11): 1123002.
- 3 P F Mcmanamon. Agile nonmechanical beam steering [J]. Optics and Photonics News, 2006, 17(3): 25–29.
- 4 I W Smith, K O H Michael. Wide-angle beam steering system: US 7215472[P]. 2007-05-08.
- 5 H Kogelnik. Coupled wave theory for thick hologram gratings [J]. Bell syst tech J, 1969, 48(9): 2909–2945.
- 6 M G Moharam, T K Gaylord. Rigorous coupled-wave analysis of planar-grating diffraction [J]. J Opt Soc Am, 1981, 71(7): 811–818.
- 7 L Solymar. A general two-dimensional theory for volume holograms [J]. Appl Phys Lett, 1977, 31(12): 820–822.
- 8 D J Cooke, L Solymar, C J R Shppard. A three-dimensional vectorial theory for volume holograms [J]. Int J Electron, 1979, 46(4): 337–356.
- 9 A Khavasi, K Mehrany, B Rashidian. Three-dimensional diffraction analysis of gratings based on Legendre expansion of electromagnetic fields [J]. J Opt Soc Am B, 2007, 24(10): 2676–2685.
- 10 Yan Aimin, Liu Liren, Liu Dean, *et al.*. Diffraction characteristics of local volume holographic gratings [J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(9): 1203–1208.  
闫爱民, 刘立人, 刘德安, 等. 局域体全息光栅的衍射特性 [J]. 光学学报, 2004, 24(9): 1203–1208.
- 11 Hu Zhijuan, Dai Cuixia, Du Guoping. Influence of grating boundary shapes on diffraction properties of gaussian pulsed beam [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(12): 3378–3385.  
胡志娟, 戴翠霞, 杜国平. 光栅边界形状对脉冲高斯光束衍射特

- 性的影响[J]. 光学学报, 2010, 30(12): 3378—3385.
- 12 Wang Chunhua, Liu Liren, Yan Aimin, *et al.*. Diffraction properties of local volume holographic grating read by an ultra short pulsed laser beam [J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(9): 1558—1564.  
王春花, 刘立人, 闫爱民, 等. 超短脉冲激光光束被局域体全息光栅衍射的性质分析[J]. 光学学报, 2007, 27(9): 1558—1564.
- 13 I V Ciaputin, L B Glebov, V I Smirnov. Modeling of Gaussian beam diffraction on volume bragg gratings in PTR glass [C]. SPIE, 2005, 5742: 183—194.
- 14 L Glebov. Fluorinated silicate glass for conventional and holographic optical elements [C]. SPIE, 2007, 6545(7): 1—9.
- 15 K Buse, A Adibi, D Psaltis. Non-volatile holographic storage in doubly doped lithium niobate crystals [J]. Nature, 1998, 393(7): 665—668.
- 16 Dong Qianmin, Liu Liren, Liu De'an, *et al.*. Effect of dopant composition ratio on nonvolatile holographic recording in  $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}:\text{Ce}$  crystals [J]. Appl Opt, 2004, 43(26): 5016—5022.
- 17 Liu Youwen, Liu Liren, Liu De'an, *et al.*. Intensity dependence of two-center nonvolatile holographic recording in  $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}:\text{Ce}$  crystals [J]. Optics, 2001, 21(10): 339—343.
- 18 Ren Liyong, Liu Liren, Liu De'an, *et al.*. Recording and fixing dynamics of nonvolatile photorefractive in  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}:\text{Mn}$  crystals [J]. J Opt Soc Am B, 2003, 20(10): 2162—2173.
- 19 A Adibi, K Buse, D Psaltis. Effect of annealing in two-center holographic recording [J]. Appl Phys Lett, 1999, 74(25): 3767—3769.
- 20 F H Mok, M G Tackitt, H M Stoll. Storage of 500 high-resolution holograms in a  $\text{LiNbO}_3$  crystal [J]. Opt Lett, 1991, 16(8): 605—607.
- 21 F H Mok. Angle-multiplexed storage of 5000 holograms in lithium niobate [J]. Opt Lett, 1993, 18(11): 915—917.
- 22 E S Maniloff, S B Altner, S Bernet, *et al.*. Recording of 6000 holograms by use of spectral hole burning [J]. Appl Opt, 1995, 34(20): 4140—4148.
- 23 Zhang Yanyan, Zhou Changhe, Liu Liren, *et al.*. Design and fabrication of high-density holographic gratings for DWDM applications [C]. SPIE, 2003, 5184: 219—225.
- 24 Z Yaqoob, M A Arain, N A Riza. High-speed two-dimensional laser scanner based on Bragg gratings stored in photothermorefractive glass [J]. Appl Opt, 2003, 42(26): 5251—5262.

栏目编辑: 李志兰