

# 基于多路复用体全息光栅的角度放大器设计

司磊 邹永超<sup>†</sup> 陶汝茂 蒋鹏志 马浩统 周朴

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 长沙 410073)

(2011年5月19日收到; 2011年7月8日收到修改稿)

为设计基于多路复用体全息光栅的角度放大器, 建立了多路复用角度放大器 (MAM) 模型, 从效率均衡性和角度分布均匀性两个方面归纳了其设计规则; 研究了光刻过程中的误差对 MAM 性能的影响; 分析了实际发散光束对 MAM 性能的影响. 研究表明: 控制光栅空间频率和光栅倾斜角可以实现需要的 MAM 角度分布, 控制光栅厚度和折射率调制深度可以实现 MAM 最佳衍射效率; MAM 最大复用路数不超过10路; 增大光栅倾角或者记录光与工作光波长之比有利于抑制参考光角度误差带来的 MAM 出射角分布误差, 减小光栅厚度有利于抑制厚度误差与折射率调制深度误差对衍射效率的影响; 当远场发散角大于光栅角半宽时, 最佳衍射效率下降到50%以下且角度选择曲线失去局部最小值; 增大空间频率或者光栅厚度可以减小所需的折射率调制深度, 增多 MAM 可复用路数, 但是不利于效率均衡性设计和抑制发散光束的影响.

**关键词:** 光学器件, 体全息光栅, 多路复用, 角度放大

**PACS:** 42.79.-e, 42.40.Eq, 42.79.Fm

## 1 引言

光束偏转技术 (或称定向技术) 广泛应用于激光通信、光存储、目标追踪等领域<sup>[1-3]</sup>. 传统的光束偏转技术都是依赖于如万向节等机械装置通过改变光轴的方向来实现光束传输方向的控制, 其结构复杂、笨重昂贵、不利于微型化<sup>[4]</sup>. 近年来发展起来的液晶相控阵、电湿法、微透镜阵列等新型光束偏转技术具有轻便灵活、功耗小、精度高、便于集成管理等优点, 更符合下一代光电系统的需要, 但是由于受到工艺水平及物理极限的限制, 通常情况下偏转范围较小, 难以达到实用水平<sup>[5-7]</sup>. 角度放大器通过对光束偏转角度的放大可以有效地扩大光束偏转系统的偏转范围, 因此, 开展高效率角度放大器件的研究有利于推动新型纯电控光束偏转技术的实用化. 体全息光栅 (VHG) 可以在特定角度衍射满足 Bragg 条件的入射光束, 因此, 通过设计合适的光栅参数获得特定的出入射角分布, 可以实现对入射光束偏转角度的放大. 与单路 VHG 相比, 多路复用体全息光栅 (MVHG) 可以实现多个离散角度的高效放大<sup>[8]</sup>, 具有更大的光束偏转范围, 可以更方便地应用在光束扫描系统中. 2003年,

Efimov<sup>[9]</sup> 发明的基于光热致折变玻璃 (PTR glass) 的 VHG 技术提供了一种制作稳定、高衍射效率、高热阈值、可多路复用 VHG 的方法, 进一步推动了 VHG 在光谱合成、光束偏转、波分复用等领域的应用. 2008年, Glebov<sup>[10]</sup> 申请了一项关于 VHG 作为角放大器的技术专利, 同年, Smith<sup>[11]</sup> 也申请了一项技术专利, 他们利用 MVHG 搭建了一种大角度纯电控光束偏转系统, 实现了  $\pm 45^\circ$  范围内的光束准连续、可编程偏转. 国内对 VHG 的研究主要集中在光谱合成、波分复用等领域, 对该器件在光束偏转领域的应用研究尚处于空白<sup>[12,13]</sup>. 总的来看, 国内外关于 MVHG 作为角放大器的研究除上述几项技术专利外, 深入、系统的理论研究尚未见报道. 本文建立了全息光栅 (包括单路 VHG 与 MVBG) 用于角放大的理论模型, 总结归纳了基于 MVHG 角度放大器的物理规律和设计准则, 研究了影响器件性能的因素, 为效率均衡、可线性扫描角放大器的设计提供参考和指导.

## 2 体全息光栅基本理论

根据 Kogelink 耦合波理论<sup>[14]</sup>, VHG 结构

<sup>†</sup> E-mail: dreamingzou2011@gmail.com

如图 1(a) 所示. 介质折射率满足  $n = n_0 + \delta n \cos(\mathbf{K} \cdot \mathbf{r})$ , 其中,  $n_0$  为介质平均折射率,  $\delta n$  为折射率振幅调制深度,  $\mathbf{K}$  为光栅矢量, 其与  $z$  轴夹角为  $\varphi$ ,  $\mathbf{r}$  为位置矢量. 图中,  $\Lambda$  为光栅周期,  $\boldsymbol{\rho}$  与  $\boldsymbol{\sigma}$  分别为入射光波和衍射光波的传输矢量, 入射角与衍射角分别为  $\theta_i$  和  $\theta_d$ . 由光栅衍射关系可以知道, 入射波、衍射波传输矢量与光栅矢量构成如图 1(b) 所示的矢量三角形.

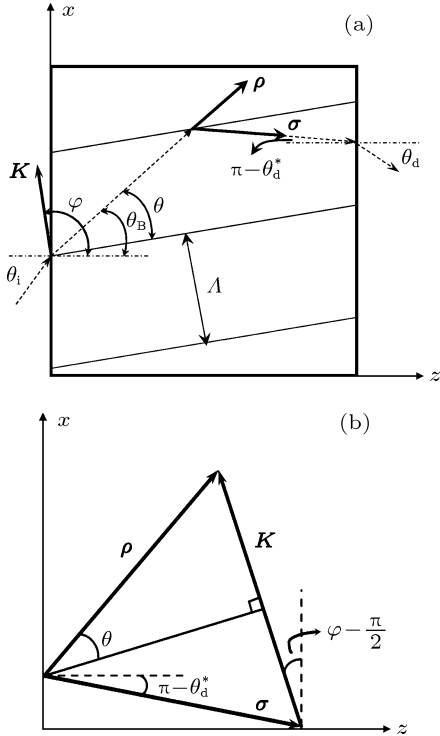


图 1 体全息光栅 (a) 结构示意图; (b) 传输矢量与光栅矢量之间关系

当入射角度满足下述 Bragg 条件时, 衍射光束以最大效率出射<sup>[14]</sup>:

$$\cos(\varphi - \theta_B) = \lambda / (2n_0\Lambda), \quad (1)$$

式中各参数意义与前述一致,  $\theta_B$  为光栅内 Bragg 角. 由图 1(b) 所示, 各角度之间满足下式关系, 各角度定义为从  $z$  轴逆时针旋转到指向矢所走的角度

$$\varphi = (\theta_B + \theta_d^* - \pi) / 2. \quad (2)$$

由折射定律可知

$$\begin{aligned} \sin(\theta_i) &= n_0 \cdot \sin(\theta_B), \\ \sin(\theta_d) &= n_0 \cdot \sin(\theta_d^*). \end{aligned} \quad (3)$$

根据 (2) 和 (3) 式可得

$$\theta_d = \sin^{-1} \left\{ n_0 \sin \left[ \sin^{-1} \left( \frac{1}{n_0} \sin(\theta_i) \right) - 2\varphi \right] \right\}. \quad (4)$$

根据 (4) 式可知, 通过设计合适的 VHG 参数, 可以使得入射光束在特定角度高效出射, 该公式是下文讨论的多路复用角放大器 (MAM) 角度分布设计的基础.

透射式 VHG 衍射效率由下式决定<sup>[14]</sup>:

$$\eta = \frac{\sin^2 \sqrt{(\phi^2 + \xi^2)}}{1 + \xi^2 / \phi^2}, \quad (5)$$

式中,  $\phi$  称为相位侵入因子, 反映 VHG 器件参数对衍射效率的影响,  $\xi$  为移相因子, 反映 Bragg 条件匹配程度对衍射效率的影响, 分别表示如下:

$$\phi = \frac{\pi \delta n d}{\lambda \sqrt{C_R C_S}}, \quad \xi = \frac{\vartheta d}{2C_S}, \quad (6)$$

其中,  $C_R = \cos(\theta_B)$ ,  $C_S = \cos(\theta_B) - \frac{\lambda}{n_0 \Lambda} \cos(\varphi)$ ,  $\vartheta$  为反映 Bragg 匹配条件的一个参数, 可以表示为

$$\vartheta = \frac{2\pi}{\Lambda} \sin(\varphi - \theta_B) \Delta\theta - \frac{\pi}{\Lambda^2 n_0} \Delta\lambda, \quad (7)$$

式中  $\Delta\theta$  表示入射角偏离 (1) 式 Bragg 条件的偏离量,  $\Delta\lambda$  表示入射光波偏离中心波长的偏移量. 假设入射光束满足 Bragg 条件, 则  $\vartheta = 0$ , VHG 衍射效率可以简化为

$$\eta = \sin^2(\phi). \quad (8)$$

由此可见, 光栅衍射效率为相位侵入因子  $\phi$  的周期函数, 当  $\phi$  满足下式时, 衍射效率可以获得极大值 1:

$$\phi = \pi/2 + m\pi, \quad (m = 0, 1, 2, \dots). \quad (9)$$

对于一个无倾斜式 VHG,  $\varphi = \pi/2$ , 则  $\phi = \frac{\pi \delta n d}{\lambda \cos(\theta_B)}$ , 因此, 当 VHG 参数满足下式时, 衍射效率可以获得最大值

$$\begin{aligned} \phi &= \frac{\pi \delta n d}{\lambda \sqrt{1 - \left( \frac{\lambda}{2n_0\Lambda} \right)^2}} = \pi/2 + m\pi, \\ (m &= 0, 1, 2, \dots), \end{aligned} \quad (10)$$

则 VHG 各参数满足:

$$\begin{aligned} d &= \frac{(1/2 + m)}{\delta n} \lambda \sqrt{1 - \left( \frac{\lambda}{2n_0\Lambda} \right)^2}, \\ (m &= 0, 1, 2, \dots), \end{aligned} \quad (11)$$

(11) 式是下文进行 MAM 效率优化设计的基础.

对于移相因子  $\xi$ , 为方便讨论, 仍然假设  $\varphi = \pi/2$ , 则有

$$\xi = \frac{\vartheta d}{2C_S} = \pi f d \Delta\theta - \frac{\pi d f^2 \Delta\lambda}{\sqrt{4n_0^2 - \lambda^2 f^2}}, \quad (12)$$

式中  $f = 1/\Lambda$ , 称为空间频率. 将 (12) 式代入 (5) 式, 分别令  $\Delta\lambda = 0, \Delta\theta = 0$ , 可得

$$\eta(\Delta\theta) = \frac{4n_0^2\delta n^2}{4n_0^2\delta n^2 + f^2\Delta\theta^2\lambda^2(4n_0^2 - \lambda^2f^2)} \times \sin^2 \sqrt{\frac{\pi^2 d^2 4n_0^2 \delta n^2}{\lambda^2(4n_0^2 - \lambda^2 f^2)} + \pi^2 f^2 d^2 \Delta\theta^2}, \quad (13)$$

$$\eta(\Delta\lambda) = \frac{4n_0^2\delta n^2}{4n_0^2\delta n^2 + f^4\lambda^2\Delta\lambda^2} \times \sin^2 \sqrt{\frac{\pi^2 d^2}{4n_0^2 - \lambda^2 f^2} \left( \frac{4n_0^2\delta n^2}{\lambda^2} + f^4\Delta\lambda^2 \right)}, \quad (14)$$

(13) 和 (14) 式分别反映了 VHG 对入射光束角度的选择性和波长的选择性. 定义衍射效率下降到第一个零点处的光束入射角度和波长分别为其角度半宽和波长半宽, 根据上两式可得

$$\Delta\theta^{\text{HW}} = \sqrt{\frac{1}{f^2 d^2} \left( 1 - \frac{d^2 4n_0^2 \delta n^2}{\lambda^2 (4n_0^2 - \lambda^2 f^2)} \right)}, \quad (15)$$

$$\Delta\lambda^{\text{HW}} = \sqrt{\frac{1}{f^4} \left( \frac{4n_0^2 - \lambda^2 f^2}{d^2} - \frac{4n_0^2 \delta n^2}{\lambda^2} \right)}. \quad (16)$$

角度半宽越小, 说明 VHG 对光束入射角越敏感, 同理, 波长半宽越小, 说明 VHG 对入射光束波长越敏感. 图 2 反映了 VHG 对入射角度和入射波长的选择性, 从图中可知, VHG 角度半宽可以达到毫弧度量级. 模拟中, 我们假设  $n_0 = 1.479, \lambda = 1.064 \mu\text{m}, \delta n = 600 \times 10^{-12}, f = 2000 \text{ mm}^{-1}$ , 达到最大衍射效率需要的光栅最小厚度  $d = 0.616 \text{ mm}$ .

利用 VHG 的角度选择特性, 基于单路 VHG 的角度放大器基本原理如图 3 所示. 当光束入射角满足 Bragg 条件时 (图中白色箭头所示), 出射光束将以  $\theta_d$  角度出射; 当入射光束入射角偏离 Bragg 角  $\Delta\theta^{\text{HW}}$  时 (图中灰色箭头所示), 出射光束将以  $\theta_i$  角度出射 (此时实际上就是透射光束, 光栅相当于一块普通的玻璃), 也就是说当光束入射角在  $[0, \Delta\theta^{\text{HW}}]$  之间变化时, 光束出射角在  $[\theta_d, \theta_i]$  变化. 因此, 我们定义角度放大率  $M = \frac{\theta_i - \theta_d}{\Delta\theta^{\text{HW}}}$ . 为便于讨论, 假设  $\phi = \pi/2$ , VHG 各参数满足最佳衍射效率条件且光栅厚度  $d$  取最小值, 则上式可表示为

$$M = \frac{2\theta_i}{\Delta\theta^{\text{HW}}} = \frac{2f\lambda \left[ 1 - \left( \frac{\lambda f}{2n_0} \right)^2 \right]^{1/2} \arcsin \left( \frac{\lambda f}{2} \right)}{\sqrt{3}\delta n}, \quad (17)$$

角度放大率公式是单路 VHG 作为角度放大器的基本依据. 假设  $n_0 = 1.479, \lambda = 1.064 \mu\text{m}$ , 角度放大率与光栅空间频率  $f$  及折射率幅度调制深度  $\delta n$  关系如图 4 所示. 由此可见, 单路角度放大器角度放大率可以达到  $10^3$  量级, 并且通过设计合适的 VHG 参数可以实现对出入射角分布以及角度放大率的控制. 但是, 从图 2(a) 可知, 入射角偏离 Bragg 条件将会造成衍射效率的下降, 因此单路角度放大器是以牺牲光束的能量传递效率为代价来实现角度放大的.

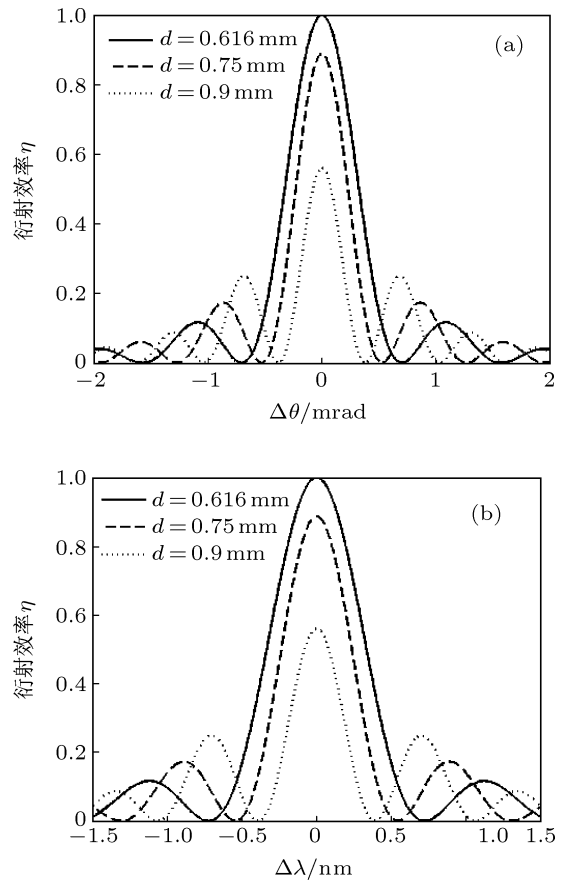


图 2 不同光栅厚度下 (a) 入射角偏离量对衍射效率的影响; (b) 波长偏离量对衍射效率的影响

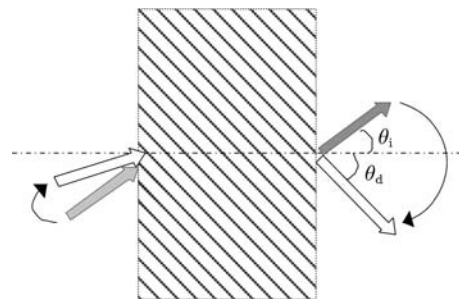


图 3 VHG 角度放大原理图

### 3 多路复用角度放大器设计

MAM 原理如图 5(a) 所示, 在光折变材料 (目前通常使用 PTR 玻璃) 中利用多次光刻技术, 记录多路 VHG, 每一路 VHG 实现对某一特定入射角的放大. 图 5(b) 为 MAM 应用结构示意图, 在 MAM 前置一个小角度精扫描器件 (如液晶相控阵等) 实现寻址 (匹配特定 VHG 的 Bragg 角), 在其后级联另一个角度精扫描器件对 MAM 的离散出射角进行填充, 这样就可以实现纯电控、高效率、准连续光束偏转 [11]. 该系统工作原理可以简述为: 1) 根据最终偏转角  $\theta$  确定 MVHG 需要放大的倍数, 以确定需要选择的 MVHG 入射角; 2) 前置精扫描器件控制光束实现对选定的 MVHG 入射角的匹配; 3) 在 MVHG 角度放大基础上, 后置角度精调器件完成角度精调, 最终实现  $\theta$  角度的光束偏转. 与单路 VHG 相比, MAM 不再以牺牲衍射效率为代价来实现准连续光束偏转. 但是, 为了获得效率均衡、可线性扫描的光束偏转系统, 我们需要对 MAM 各路 VHG 的衍射效率及出入射角度分布开展深入的理论研究以便对其进行优化设计.

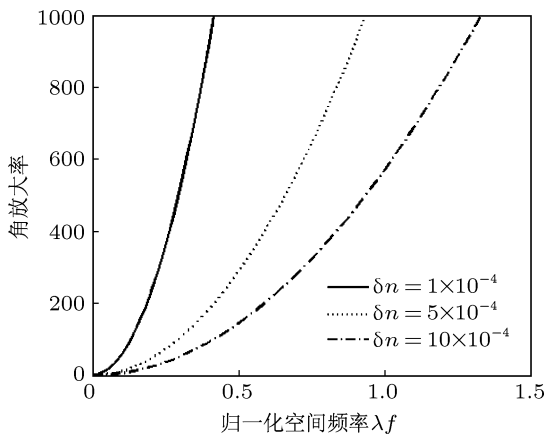


图 4 VHG 参数与角放大率的关系

#### 3.1 角度放大器效率均衡性设计

角度放大器效率均衡性是指各路 VHG 能够实现均衡的衍射效率, 这对于实际的光电系统具有重要的意义. 根据 Kogelink 耦合波理论, 单块介质能够复用的 VHG 路数决定于介质的最大折射率调制深度  $\Delta n_{\max}$  和单路 VHG 折射率调制深度  $\delta n_{\text{opt}}$ , 只有满足  $\sum_i \delta n_{\text{opt}}(i) < \Delta n_{\max}$  时, 各路 VHG 才能保持互不干扰, 违反该原则时, 各路 VHG 的衍射效率将下降为最佳效率的  $1/N^2$  ( $N$  复用的为 VHG 路

数)<sup>[15]</sup>. 图 6 为  $n_0 = 1.479$ ,  $\lambda = 1.064 \mu\text{m}$ ,  $d = 2.5 \text{ mm}$ ,  $f = 2000 \text{ mm}^{-1}$  时, 不同光栅倾斜角  $\varphi$  对应的最佳折射率调制深度. 由此可见,  $\delta n_{\text{opt}}$  一般在  $10^{-4}$  量级, 随着光栅矢量偏离  $x$  轴方向,  $\delta n_{\text{opt}}$  减小. 对于 PTR 玻璃,  $\Delta n_{\max}$  一般可以达到  $10^{-3}$  量级 [8], 也就是说, 在同一块 PTR 玻璃中可复用的 VHG 数目理论上不超过 10 个.

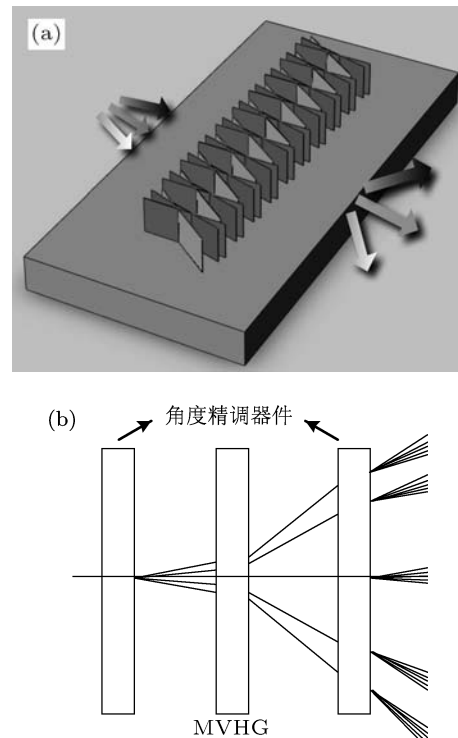


图 5 多路复用角放大器 (a) 示意图; (b) 应用结构图

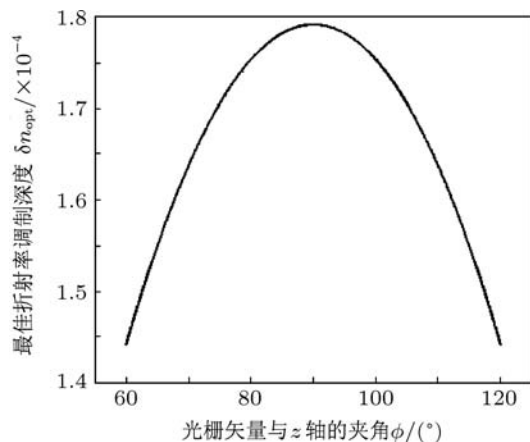


图 6 倾斜角对最佳折射率调制深度的影响

图 7 为  $\varphi = 90^\circ$  时, 不同空间频率和光栅厚度下折射率调制深度对衍射效率的影响曲线. 空间频率及光栅厚度增大都会使得需要的最佳折射率调制深度减小, 有利于增多单块介质中复用的 VHG

数量. 但是, 空间频率与光栅厚度的增加同时使得效率曲线变得陡峭, 衍射效率对折射率调制深度变化更为敏感, 这不利于抑制制作误差对衍射效率的影响.

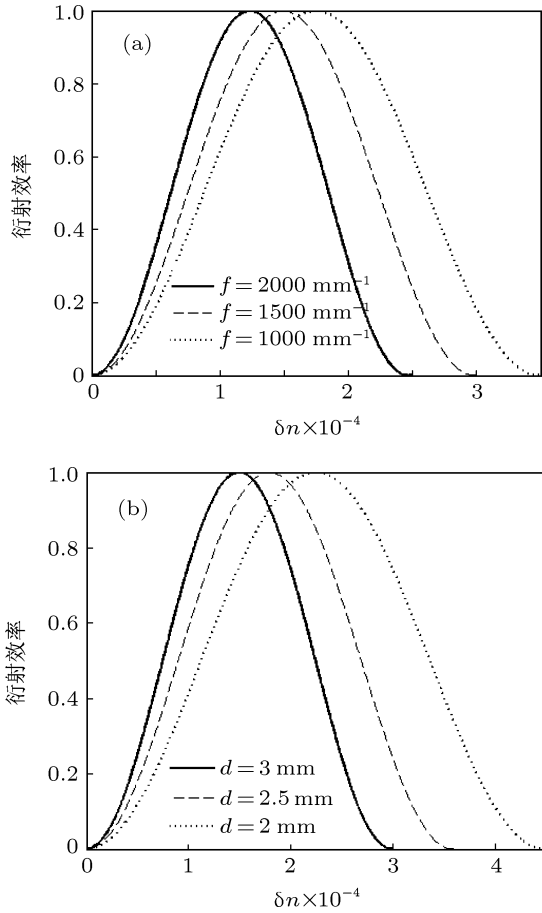


图 7 折射率调制深度对衍射效率的影响 (a) 不同空间频率; (b) 不同光栅厚度

在满足  $\sum_i \delta n_{opt}(i) < \Delta n_{max}$  前提下, MVHG 在制作过程中, 光刻对之前形成的全息图的擦除效应是引起衍射效率非均衡的主要因素. 在形成新的干涉条纹之前需要平衡对前一幅全息图的擦除效应, 最大限度地实现各路 VHG 的最佳衍射效率. 时间递减曝光方法和循环曝光方法可以较好地克服多次曝光过程中的擦除效应, 其中循环曝光方法应用较多, 以较短的时间  $\Delta t$  为周期, 依次刻蚀各路 VHG, 不断循环, 直到实现衍射效率均衡的全息图, 该方法可以有效地实现 MVHG 的效率均衡性 [16,17]. 由图 7 可知, 减小光栅厚度和空间频率可以使得折射率调制深度对衍射效率的影响曲线变得平滑, 因此, 可以减小擦除效应对衍射效率的影响. 但是, 减小光栅厚度和空间频率同时使得所需的最佳折射率调制深度变大, 这会减小单块 PTR 玻

璃中可复用的 VHG 路数, 根据 (11) 式可知, 光栅厚度减半, 可复用的路数也将减半. 因此, 实际设计过程中, 需要平衡这些因素的影响, 根据具体需求设计 MVHG 的参数.

### 3.2 角度放大器角度均匀性设计

为便于实现程控以及线性扫描的功能, MAM 应该尽量实现均匀的出入射角分布. 设  $N$  路复用角放大器 Bragg 角分别为  $\theta_{i,1}, \theta_{i,2}, \dots, \theta_{i,N}$ , 对应的衍射角分别为  $\theta_{d,1}, \theta_{d,2}, \dots, \theta_{d,N}$ , 我们定义 MAM 相对角放大率如下:

$$M_r(n-1) = \frac{\theta_{d,n} - \theta_{d,n-1}}{\theta_{i,n} - \theta_{i,n-1}}, \quad (n = 2, 3, \dots, N). \quad (18)$$

当  $M_r(1) = M_r(2) = \dots = M_r(N-1)$  且入射角  $\theta_i$  均匀变化时, 出射角将保持均匀分布, 实现图 8 所示理想的出入射角分布, 便于实现具有线性扫描功能的光束偏转系统, 模拟中假设  $\theta_i$  从  $0^\circ$  到  $3^\circ$  之间均匀变化. 在实际设计中, 并不需要保证  $\theta_i$  在  $0^\circ$  左右, 而只需要保证不同  $\theta_i$  之间相对值较小即可, 例如  $\theta_i$  在  $30^\circ$  到  $33^\circ$  之间变化, 与  $\theta_i$  在  $0^\circ$  到  $3^\circ$  之间变化效果一样, 我们可以使角度放大器与入射光束整体保持一个  $30^\circ$  的夹角, 则入射光束仍然只需要在  $0^\circ$  到  $3^\circ$  之间扫描即可.

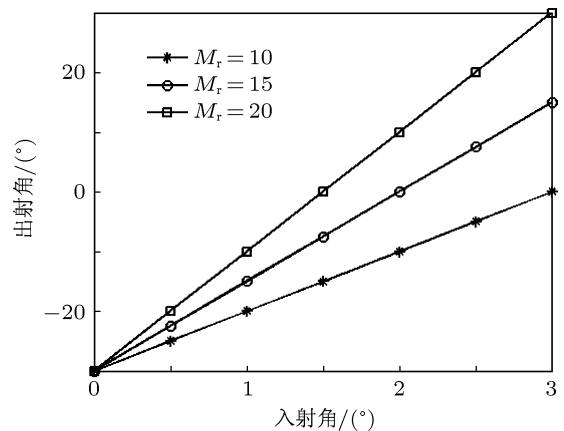


图 8 角度均匀分布图

由 (1) 到 (4) 式可知, 角放大器出入射角关系由光栅空间频率  $f$ , 光栅倾斜角  $\varphi$ , 以及介质折射率决定, 而介质折射率为一常数, 因此, 实际只能控制  $f$  和  $\varphi$  来实现所需的出入射角分布. 图 9 为  $n_0 = 1.479, \lambda = 1.064 \mu\text{m}, f = 100\text{--}1500 \text{ mm}^{-1}$  时, 光栅在不同倾斜角  $\varphi$  下的出入射角关系曲线. 由此可见, 出射角与入射角近似为线性关系, 光栅

倾角  $\varphi$  决定关系曲线与  $y$  轴的交点而基本上不改变近似直线的斜率, 而根据 (1) 式可知, 当光栅倾角  $\varphi$  一定时, 入射角由  $f$  决定. 根据上述规律我们可以总结 MAM 出入射角分布的设计方法: 1) 利用设定的出入射角的值, 根据 (4) 式, 计算需要的  $\varphi$  值; 2) 利用  $\varphi$  值与入射角的值, 根据 (1) 式计算  $f$  值; 3) 重复上两步, 计算得到 MAM 需要复用的各路 VHG 的参数. 利用上述分析, 我们以三路复用角放大器为例, 设计参数如表 1 所示, 入射角分别为  $9^\circ, 10^\circ, 11^\circ$ , 对应出射角为  $0^\circ, -10^\circ, -20^\circ$ , 此时相对角放大率为 10. 按照设计的  $f$  和  $\varphi$  值制作 MVHG 即可实现均匀的角度放大.

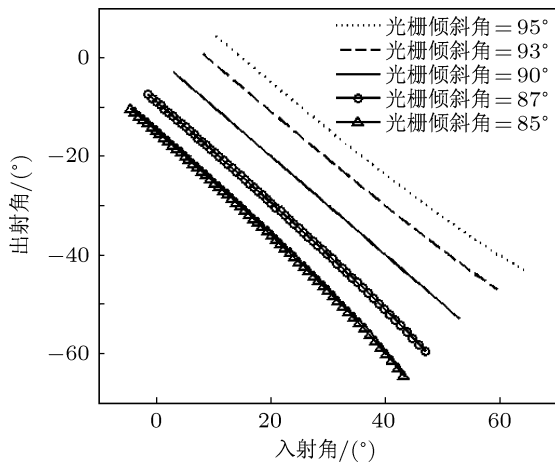


图9 出入射角关系

表1 多路复用角放大器出入射角设计

	VHG1	VHG2	VHG3
$\theta_i/(\circ)$	11.00	10.00	9.00
$\theta_d/(\circ)$	-20.00	-10.00	0.00
$\varphi/(\circ)$	87.02	90.00	93.04
$f/\text{mm}^{-1}$	1171.80	1390.00	556.99

## 4 角放大器性能研究

### 4.1 制作误差带来的影响

通常使用波长为  $\lambda_0$  的光束对光致折变材料进行光刻制作 MVHG, 假设光栅倾角为  $\varphi$ , 光栅内 Bragg 角为  $\theta_{B0}$ , 当 MVHG 工作在  $\lambda$  时, 根据 (1) 式可知, 不同波长下 Bragg 角满足下式关系:

$$\cos(\varphi - \theta_{B0})/\cos(\varphi - \theta_B) = \lambda_0/\lambda. \quad (19)$$

目前一种较为常用的 MVHG 的制作方法为: 固定基底和一个光束的方向, 依次改另一个光束 (通常为参考光) 的方向以实现多个 VHG 的光刻. 根

据 (2) 和 (3) 式可得参考光角度误差带来的 VHG 倾斜角误差与 MAM 角度分布误差如下:

$$\Delta\varphi = \frac{1}{2n_0} \frac{\cos(\theta)}{\sqrt{1 - [\sin(\theta)/n_0]^2}} \Delta\theta, \quad (20)$$

式中  $\theta$  为参考光与介质表面法线方向夹角,  $\Delta\theta$  为参考光角度误差,  $\Delta\varphi$  为光栅倾角误差. 根据 (19) 和 (20) 式可得

$$\Delta\theta_i = \frac{n_0 \sqrt{1 - [\sin(\theta_i)/n_0]^2}}{\sqrt{1 - [\sin(\theta_i)]^2}} \times \left\{ 1 + \frac{\lambda}{\lambda_0} \frac{\sin\{\varphi - \sin^{-1}[\sin(\theta)/n_0]\}}{\sin\{\varphi - \sin^{-1}[\sin(\theta_i)/n_0]\}} \right\} \times \Delta\varphi, \quad (21)$$

式中  $\theta_i$  为 VHG 工作在  $\lambda$  时的入射角,  $\Delta\theta_i$  为参考光角度误差带来的入射角误差. 根据 (2),(3) 和 (21) 式可得

$$\Delta\theta_d = \frac{n_0 \sqrt{1 - [\sin(\theta_d)/n_0]^2}}{\sqrt{1 - [\sin(\theta_d)]^2}} \times \left\{ 1 - \frac{\lambda}{\lambda_0} \frac{\sin\{\varphi - \sin^{-1}[\sin(\theta)/n_0]\}}{\sin\{\varphi - \sin^{-1}[\sin(\theta_d)/n_0]\}} \right\} \times \Delta\varphi, \quad (22)$$

式中  $\theta_d$  为 VHG 工作在  $\lambda$  时的出射角,  $\Delta\theta_d$  为参考光角度误差带来的出射角误差.

图 10 为制作过程中参考光角度误差带来的 MAM 角度误差曲线. 假设  $n_0 = 1.479, \lambda = 1064 \text{ nm}$ , 图中  $\theta_0$  指光刻过程中物光与基底面法线夹角. 由图 10 可见, 随着参考光角度误差增大, MAM 出入射角度误差都将增大, 且均近似为线性关系; 由图 10(a) 可知, 随着光栅倾斜角  $\varphi$  增大或者记录波长与工作波长之比增大, MAM 入射角度误差随参考光角度误差变化的趋势将会加剧; 由图 10(b) 可知, 光栅倾斜角  $\varphi$  增大或者记录波长与工作波长之比增大, 有利于减缓 MAM 出射角度误差随参考光角度误差变化的趋势. 一般来说, MAM 出射角的精度对光束偏转系统来说具有更重要的意义, 因此, 在 MAM 参数的设计过程中, 应该考虑采用较大的  $\varphi$  值或者尽量选择波长较长的激光作为光刻光源.

前文讨论了制作误差对 MAM 角度分布的影响, 下面简要讨论制作误差对 MAM 效率的影响. 光栅厚度与折射率调制深度是 VHG 衍射效率的决定因素, 而折射率调制深度直接决定于记录光光强

及曝光时间,因此,基底厚度误差、记录光光强及曝光时间误差将会引起 MAM 衍射效率偏离设计的最佳值.图 7(a)及图 7(b)已分别讨论了折射率调制深度与光栅厚度对衍射效率的影响,由图所示关系曲线可知,减小光栅厚度或者光栅空间频率有利于抑制厚度误差及折射率误差带来的影响.实际制作过程中,折射率调制深度值与记录光光强与曝光时间的关系是一个非常复杂的物理化学问题,很难给出定量的公式,一般做法是在循环曝光的过程中,实时监控各路 VHG 的衍射效率,直到衍射效率达到最大值.

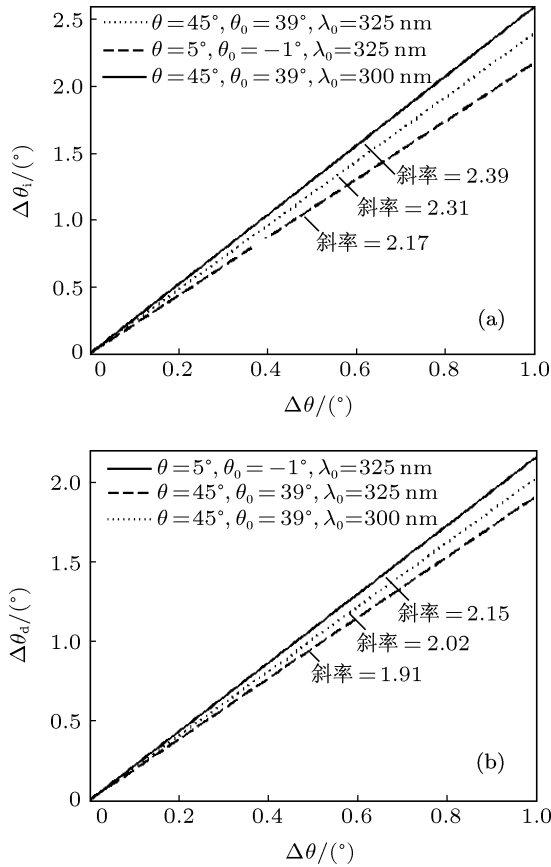


图 10 参考光角度误差引起的 MAM (a) 入射角分布误差; (b) 出射角分布误差

### 4.2 实际光束特性的影响

上文分析的 MAM 的特性都是基于入射光束为理想平行光束,而实际应用系统中,入射光束一般具有一定的远场发散角,而且该角度相比于 VHG 角度半宽  $\Delta\theta^{HW}$  并不能忽略.下文简要分析光束远场发散角对 MAM 的影响.我们定义实际入射光束的衍射效率为  $\eta_r$ ,假设入射光束远场发散角近似满足 Gauss 函数,入射光束传输方向满足 Bragg 条件,

则入射光束归一化光强分布在角谱域可表示为<sup>[18]</sup>

$$G(\theta, \theta_{Div}) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{1}{\theta_{Div}} \exp\left[-2\left(\frac{\theta - \theta_i}{\theta_{Div}}\right)^2\right], \quad (23)$$

式中,  $\theta_{Div}$  表示入射光束远场发散角,  $\theta_i$  表示 VHG Bragg 角.利用 (13) 及 (18) 式可得

$$\eta_r = \int \eta(\theta) G(\theta, \theta_{Div}) d\theta. \quad (24)$$

利用 (24) 式,可得图 11 所示的不同光束发散角情况下 VHG 衍射效率曲线,图中实线为根据图 2 中参数所得的最佳衍射效率曲线,虚线分别为不同远场发散角对应的衍射效率曲线.由此可知,入射光束远场发散角使得 VHG 角度选择性变差,随着远场发散角的增大,衍射效率曲线越来越平滑,衍射效率的最大值和最小值分别偏离 1 和 0 越来越远.利用图 2 参数可得对于平行光  $\Delta\theta^{HW} = 0.81$  mrad,当光束远场发散角  $\theta_{Div}$  大于 VHG 角度半宽  $\Delta\theta^{HW}$  时,最佳衍射效率下降到 50% 以下,且角度选择曲线不再具有局部最小值.

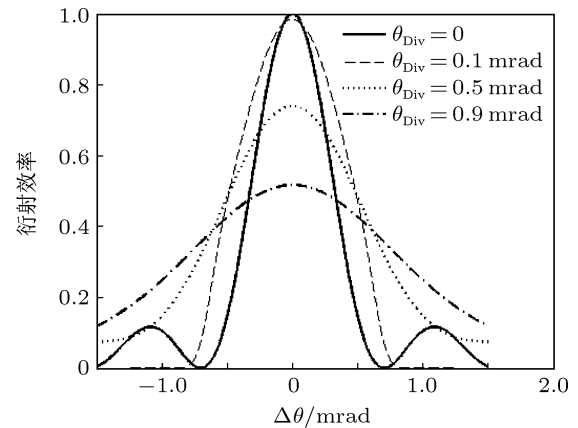


图 11 远场发散角对 VHG 角度选择性影响

远场发散角使得角度放大器衍射效率明显下降,对于单路角度放大器,会使得角度放大率减小.对于 MAM,由于远场发散角使得角度选择曲线变得平滑,因此各路 VHG 之间可能出现串扰,即对应一个入射角,远场同时出现两个甚至更多个衍射光束,这会大大降低 MAM 的性能.图 12 为在不同光栅厚度、空间频率下,发散光束的角度选择曲线,图中  $\phi$  为相位侵入因子,对应光栅厚度,假设光栅倾斜角  $\varphi = 90^\circ$ ,光束远场发散角为 0.5 mrad,其他参数与上文保持一致.由图可见,减小光栅厚度与空间频率可以明显改善发散光束的角度选择曲线,有利于克服远场发散角带来的衍射效率曲线变平滑的问题.

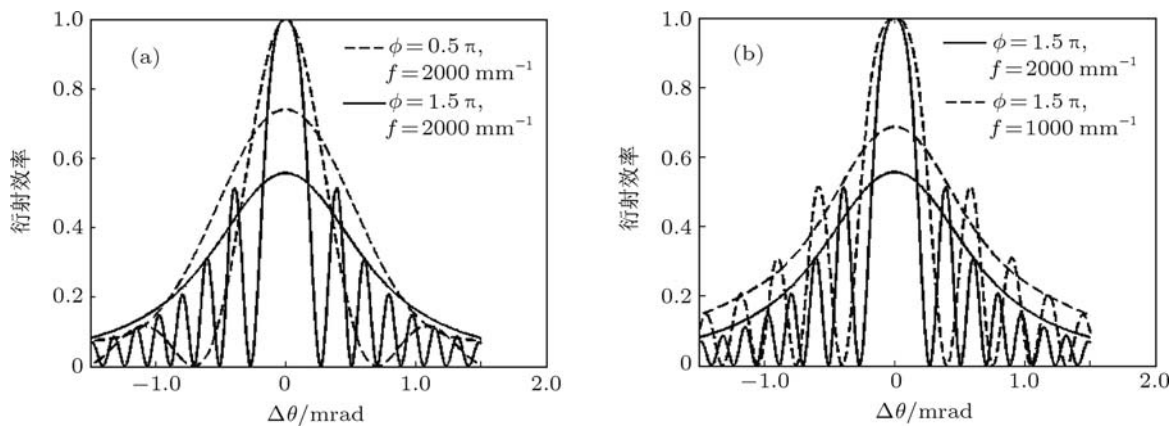


图12 发散光束对 (a) 不同光栅厚度及 (b) 不同空间频率下 VHG 角度选择性的影响

## 5 结论

本文在讨论 VHG 特性的基础上,建立了单路角度放大器模型,并分析了其物理特性,然后,建立了 MAM 的物理模型,推导了 MAM 出入射角关系式,分别从效率均衡性和角度均匀性两个方面总结了 MAM 的设计方法和物理规律.本文还研究了制作误差对 MAM 性能的影响,推导了参考光角度误差带来的 MAM 角度分布误差公式,定性分析了光栅厚度误差与折射率调制深度误差对 MAM 衍射效率的影响,最后分析了远场发散光束对 MAM 性能的影响,并提出了改进措施.研究结果表明: 1) 单路 VHG 以牺牲衍射效率为代价来实现角度放大,角度放大率可以达到  $10^3$  量级; 2) MAM 可复用的路数主要由各路 VHG 最佳折射率调制深度之和与基底材料的最大折射率调制深度决定,前者不可大于后者,以目前工艺条件

下 PRT 玻璃为例, MAM 复用路数不超过 10 路,增大光栅厚度或者空间频率有利于复用更多的 VHG,光栅厚度增大一倍,可复用的 VHG 路数也将增大一倍; 3) MAM 角度分布由光栅空间频率  $f$  和光栅倾角  $\varphi$  共同决定, MAM 效率均衡性由折射率调制深度  $\delta n$  和光栅厚度  $d$  共同决定,减小光栅厚度或者空间频率有利于减弱 VHG 衍射效率对折射率调制深度变化的敏感性,便于效率的均衡性设计; 4) MAM 出入射角误差与光刻中参考光角度误差近似为线性关系,增大光栅倾角或者增大记录光与工作光波长之比有利于抑制参考光角度误差给 MAM 出射角带来的影响; 5) 远场发散光束会使得 MAM 角度选择性变差,当远场发散角大于角度半宽时,最佳衍射效率下降到 50% 以下,且角度选择曲线失去局部最小值, MAM 出现严重串扰,可以通过减小光栅厚度或者空间频率来抑制光束远场发散角的影响.

- [1] Winker B, Mahajan M, Hunwardsen M 2004 *Proc. IEEE* **3** 1702  
 [2] Akatay A, Urey H 2007 *Opt. Express* **15** 4523  
 [3] Reicherter M, Haist T, Wagemann E, Tiziani H 1999 *Opt. Lett.* **24** 608  
 [4] McManamon P F, Dorschner T A, Corkum D L, Friedman L J, Hobbs D S, Holz M, Liberman S, Nguyen H Q, Resler D P, Sharp R C, Watson E A 1996 *Proc. IEEE* **84** 268  
 [5] Zhang J, Fang Y, Wu L Y, Xu L 2010 *Chinese J. Lasers* **37** 326 (in Chinese) [张健, 方运, 吴丽莹, 徐林 2010 *中国激光* **37** 326]  
 [6] Tholl D H 2006 *Proc. SPIE* **6397** 639708-1  
 [7] McManamon P F 2005 *Proc. SPIE* **5947** 594701-1  
 [8] Glebov L B 2008 *Proc. Advanced Solid-State Photonics, OSA Technical Digest Series, MD1*  
 [9] Efimov O M 2004 *U.S. Patent* 6 673 497  
 [10] Glebov L B 2008 *U.S. Patent* 7 324 286  
 [11] Smith I W 2008 *U.S. Patent* 7 428 100  
 [12] Zheng H B, He Y L, Tan J C, Ding D Y, Liu Y X, Yu X Y, Zheng G W, Wang X, Wang X D 2010 *Chin. Opt. Lett.* **8** 738  
 [13] Zhang Y, Zhang B, Zhu S J 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 4590 (in Chinese) [张艳, 张彬, 祝颂军 2007 *物理学报* **56** 4590]  
 [14] Kogelink H 1969 *Bell Sys. Tech. J.* **48** 2909  
 [15] Yaqoob Z, Arain M A, Riza N A 2003 *Appl. Opt.* **42** 5251  
 [16] Moke F H, Tachitt M C, Stoll H M 1993 *Opt. Lett.* **18** 607  
 [17] Maniloff E S, Johnson K M 1993 *J. Appl. Phys.* **73** 541  
 [18] Ciapurin I V, Glebov L B, Smirnov V I 2005 *Proc. SPIE, Practical Holography XIX: Materials and Applications* **5742** 183

# Design of angular magnifier based on multiplexed volume holographic grating

Si Lei   Zou Yong-Chao<sup>†</sup>   Tao Ru-Mao   Jiang Peng-Zhi  
Ma Hao-Tong   Zhou Pu

(College of Optoelectronics Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

(Received 19 May 2011; revised manuscript received 8 July 2011)

## Abstract

In order to design an angular magnifier based on multiplexed volume holographic grating, the physical model of multiplexed angular magnifier (MAM) is established. The design principle is summarized from two aspects, namely, uniform angular distribution and optimum diffraction efficiency. The effect of production error on MAM is studied. The effect of beam divergence on the performance of MAM is investigated. The results show that the desired angular distribution of MAM is achieved by controlling the spatial frequency and the tilted angle of the grating while the optimum diffraction efficiency is achieved by controlling the thickness and the amplitude of refractive index modulation of the gratings. The 10 VHGs can be multiplexed in the MAM at most. The raising of the grating tilted angle or the ratio between the wavelength of recording beam and working beam can weaken the effect of angular error of reference beam on the output angle distribution of MAM, and the reducing of the thickness is beneficial for reducing the effect of error of thickness and refractive index modulation on diffraction efficiency. When the beam divergence is greater than the angular half width, the optimum diffraction efficiency falls down to 50% or lower and the local minimum values disappear. The raising of the spatial frequency or thickness of the gratings can reduce the desired amplitude of refractive index modulation and multiplex more VHGs, but is not beneficial for achieving uniform diffraction efficiency distribution and weakening the effect of divergent beam.

**Keywords:** optical devices, volume holographic grating, multiplexed, angular magnification

**PACS:** 42.79.-e, 42.40.Eq, 42.79.Fm

---

<sup>†</sup> E-mail: dreamingzou2011@gmail.com