

提升全息光栅掩模占空比均匀性的曝光系统

许晨璐¹, 赵宇暄¹, 冒新宇², 曾理江^{1*}¹清华大学精密仪器系精密测试技术及仪器国家重点实验室, 北京 100084;²北京至格科技有限公司, 北京 100089

摘要 在基于衍射光栅光波导的增强现实近眼显示设备中,光栅的占空比均匀性对成像均匀性影响很大。提出一种提升全息光栅掩模占空比均匀性的罗艾镜曝光系统,该系统采用移动挡板和改变干涉场光强的方法,来补偿全息曝光时高斯光束光强不均匀导致的光栅掩模占空比不均匀。实验中使用该方法制备的光栅,其占空比的极差相比用传统罗艾镜曝光系统制作的光栅降低了 66% 以上;制成的衍射光波导片的纯色屏幕的均匀性至少提升 30%。

关键词 光栅; 全息曝光; 占空比; 衍射光波导; 成像均匀性

中图分类号 O439 文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS221891

1 引言

基于浮雕光栅衍射光波导镜片的增强现实近眼显示系统^[1-3],具有体积小、环境透过率高、成像畸变小、眼动范围大以及便于大规模制造的优势。其中成像均匀性^[2,4]是衍射光波导镜片的一项重要指标。浮雕光栅的占空比均匀性直接影响近眼显示模组的角度均匀性和位置均匀性^[4],制作占空比均匀的光波导镜片是非常关键的。

全息曝光是一种常见的光栅制作方法,当使用该方法时,如果曝光光强不均匀,曝光基板上不同区域的光刻胶吸收的能量不同,进而导致不同区域的光刻胶在显影液中溶解速率不同,最终产生了与不均匀曝光光强分布相对应的占空比分布。这种不均匀难以通过后续的刻蚀等步骤补偿,必须在曝光阶段予以消除。全息曝光使用的准直激光为高斯光束,越靠近光束中心的位置光强分布越“平坦”,因此越靠近中心区域的曝光量也越均匀。全息曝光主要分为分振幅的双光束曝光和分波面的罗艾镜曝光两种方案^[5],其中罗艾镜曝光可以方便、准确地调节光栅周期,在彩色浮雕光栅光波导镜片的制作中被广泛使用^[6-7]。但由于罗艾镜分波面的光路布置特点,光束中心位于曝光基板与罗艾镜的交线上,实际使用光强较为均匀的“平坦”区域面积只有双光束曝光的一半。特别是如果衍射光波导中有二维光栅^[3],在通过旋转基板的二次曝光制作二维光栅时,两次曝光中基板接收“平坦”光束的区域不一致,进一步加剧了罗艾镜曝光中曝光量不均匀的

问题。

改善曝光量均匀性的主要方法是增大准直光束直径,只利用高斯光束中心附近光强分布最“平坦”的区域进行曝光。这种方法虽然简易可行,但是会将大量光能耗费在曝光区域以外,大大降低曝光区域光强、延长所需的曝光时间,这不仅对曝光环境的稳定性提出了更高的要求,同时也会降低制备光栅的生产效率。近年来有采用光束整形器将高斯光束转化为平顶光束并用于罗艾镜曝光的研究^[8-9]。整形镜组需要形貌复杂的非球面镜,这对整形镜的加工提出了较高的要求。虽然光强的整体分布已被整形镜转化为平顶函数,但光束经过整形镜组后不能再次进行空间滤波,因此光束中高频误差导致光栅的杂散光增加,进而降低波导片的图像对比度^[7,10]。

在不显著增加光栅的制备时间也不引入新的杂散光来源的前提下,本文提出一种曝光过程中光强可控的罗艾镜曝光系统,用于制备占空比更均匀的光栅掩模。该方法通过移动挡板和转动半波片来调控曝光量,使在整个曝光时间内,基板不同位置的曝光量相同,从而得到占空比更均匀的光栅。本文先介绍实验原理和主要实验参数的计算方法,然后在此基础上完成光栅制作和效果测量实验。

2 实验原理

2.1 曝光量调控的基本原理

曝光量即曝光基板上涂覆的光刻胶在曝光过程接收的总能量密度。假设形成曝光干涉场的两束相干光

收稿日期: 2022-10-28; 修回日期: 2022-11-17; 录用日期: 2022-11-22; 网络首发日期: 2022-12-02

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB2802100)

通信作者: *zenglj@tsinghua.edu.cn

照射在基板上 (x, y) 点的强度相同, t 时刻该点的干涉条纹光强记为 $I(x, y, t)$ 。当该点从 t_1 时刻开始曝光, t_2 时刻停止曝光, 其总曝光量分布 $D(x, y)$ 可以表示为

$$D(x, y) = \int_{t_1}^{t_2} I(x, y, t) dt. \quad (1)$$

如果曝光过程中光强不变, 曝光一定时间后, 总曝光量 $D(x, y) = I(x, y)(t_2 - t_1)$, 其曝光量的空间分布完全取决于曝光场的光强分布。而如果可以控制基板上每一点的曝光时间(即动态地改变积分的上、下限), 并同时动态地调整光强(即直接动态改变被积的光强函数), 则可以实现对曝光量的灵活调控, 以补偿不均匀的曝光量空间分布。

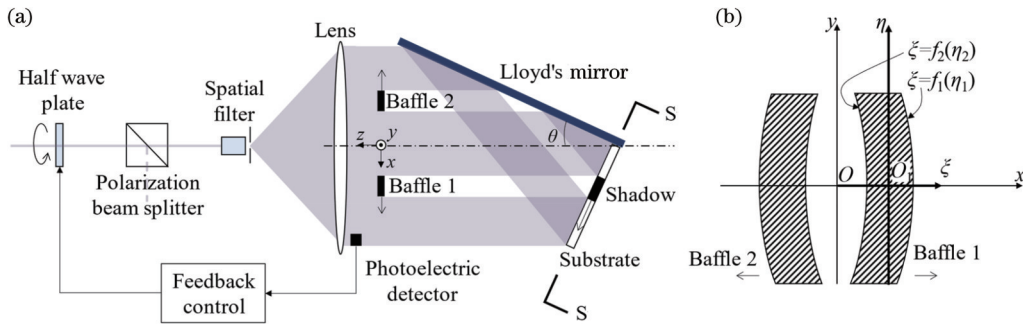


图 1 基于罗艾镜的曝光量调控装置图。(a)俯视图;(b)S平面截面图

Fig. 1 Exposure dose modulation setup based on Lloyd's mirror. (a) Top view; (b) sectional view of plane S

光路中可电控旋转的半波片以及由移动台(未画出)带动的挡板, 用于调整基板上不同位置的曝光光强和曝光时间。挡板所在平面为 xOy 平面, 两个挡板关于 yOz 平面互为镜像。探测器用于测量曝光过程中不同时刻的光强。曝光时, 光电探测器接收到的光强与预先设定的曝光光强的偏差经过处理后作为控制信号, 控制半波片的旋转。细光束通过半波片后偏振方向发生变化, 通过偏振分光棱镜时分光比改变, 从而实现了光强的调控; 扩束后的准直光束被挡板部分遮挡, 用于减少基板上对应区域的曝光时间。因此, 曝光过程中移动挡板和旋转半波片形成了对基板曝光量的调控。

假设入射光束的光强分布关于 yOz 平面镜像对称, 根据罗艾镜反射的对称性, 入射在曝光基板表面同一点的两部分光强相同, 而且两个挡板在曝光基板表面的投影重合, 只要在保持对称关系的同时平移挡板, 就能实现在曝光过程中对基板上不同区域的完全遮挡。挡板所在平面 xOy 如图 1(b) 所示。设基板表面所在平面为 S, 平面 S 与 xOy 上的点可以按照平行光的投影关系一一对应。在 S 平面中, 原点 O' 也落在光轴上, y' 轴为罗艾镜与基板的交线, 与 y 轴平行, x' 轴为基板上与 y' 轴垂直的直线, 平行于光栅矢量方向。由光路的几何关系可知, xOy 平面上任意一点 (x, y) 投

2.2 可调控曝光量的罗艾镜曝光系统

图 1(a) 展示了光路的俯视图, 罗艾镜与基板垂直, 二者都安装在转台上(未画出), 转轴为罗艾镜与基板的交线, 与光轴垂直相交。坐标系的 z 轴为光轴; y 轴与待制备光栅的栅线方向平行, 也平行于转台转轴。激光经半波片和偏振分光棱镜后, 入射到空间滤波器上, 经扩束与针孔滤波后, 被准直镜准直成平行光。该平行光的一部分光被罗艾镜反射到基板上, 与直接入射到基板上的光产生干涉, 形成曝光干涉条纹, 对基板进行曝光。曝光波长 λ 、罗艾镜镜面与光轴的夹角 θ 共同决定了将要制备光栅的周期 $d = \lambda / (2 \sin \theta)$ 。通过转台调整 θ , 可改变所制作光栅的周期。

影在平面 S 上的坐标为 $(x/\cos \theta, y)$ 。为表述方便, 接下来的分析均在投影前的 xOy 平面内 $x > 0$ 的半平面中进行, 所述的“曝光面积”“光强”“曝光量”等都指在这个半平面中进行测量或计算的结果。

建立随挡板移动的坐标系 $\xi O_1 \eta$, 在 $t = 0$ 时刻, 坐标系 $\xi O_1 \eta$ 与 xOy 重合, 挡板沿 x 轴移动, 则 $\eta = y$ 。挡板两侧的轮廓表达式分别为 $\xi_1 = f_1(\eta)$ 和 $\xi_2 = f_2(\eta)$ 。对于 xOy 平面上任意一点 (x, y) , 在 $t = 0$ 时刻开始曝光, 在 $t = t_1$ 时刻开始被挡板遮挡, 在 $t = t_2$ 时刻挡板遮挡结束继续曝光, 在 $t = t_3$ 时刻结束曝光。则这一点的曝光量表达式为

$$\begin{cases} D(x, y) = \int_0^{t_1} I(x, y, t) dt + \int_{t_2}^{t_3} I(x, y, t) dt \\ t_1 = \int_0^{x-f_1(y)} \frac{1}{v(x)} dx \\ t_2 = \int_0^{x-f_2(y)} \frac{1}{v(x)} dx \end{cases}, \quad (2)$$

式中: $v(x)$ 为挡板的移动速度。由于通过半波片和偏振分光棱镜不能调节扩束准直后光束在不同空间位置的光强分布, 令 $I(x, y, t) = M(t)I_0(x, y)$, 其中 $I_0(x, y)$ 代表波片旋转至光强最大位置时的光强分布, $M(t)$ 为光强调制系数, 能够实现的调制范围为

$0 < M(t) \leq 1$ 。理论上改变 $v(x)$ 或 $M(t)$ 都可以改变曝光量,但考虑到挡板移动时,移动台的加速度误差较大,因此设定 $v(x)$ 为常数,通过改变 $M(t)$ 来调控曝光光强更方便可行。

在获得光强分布 $I_0(x, y)$ 之后,为制备占空比更均匀的全息光栅,需要进行数值优化以得到在曝光区域内尽可能均匀的曝光量分布 $D(x, y)$ 。在数值优化中,可以作为自变量的参量有:描述挡板轮廓形状的函数 $f_1(\eta)$ 、 $f_2(\eta)$,挡板的移动速度 $v(x)$,以及光强调制系数 $M(t)$ 。在框定了需要优化的曝光区域之后,选择优化的目标函数为

$$D_r = \frac{D_{\max} - D_{\min}}{D_{\max}}, \quad (3)$$

式中: D_{\max} 和 D_{\min} 分别为该区域内曝光量的最大值、最小值; D_r 为曝光区域内曝光量相比最大位置衰减的最大百分比,因此可以作为曝光量不均匀性的评价指标, D_r 越小则曝光量分布越均匀。对于不调控曝光量的传统罗艾镜曝光系统,有 $D(x, y) = I_0(x, y)t$, 则 $D_r = (I_{\max} - I_{\min})/I_{\max}$, 其中 I_{\max} 和 I_{\min} 分别为曝光区域内光强 $I_0(x, y)$ 的最大值和最小值;在所提出的曝光量调控系统中, D_r 中的 D_{\max} 和 D_{\min} 则按照式(2)进行计算。

2.3 近似与简化

由于挡板的几何尺寸在几十毫米的量级,而挡板到曝光基板的距离一般不会超过 200 mm,因此在 397 nm 的曝光波长下,这一距离远小于菲涅耳近场衍射近似条件所需的下限,产生显著衍射图样的范围仅在投影边缘附近零点几毫米内;加之挡板在曝光过程中持续移动,基板上任意位置接收到衍射图样的时间极短,因此可以近似忽略光束在被挡板部分遮挡后,其衍射效应对光栅的影响,只需要按照几何投影的方法对遮光部分进行分析计算即可。

在罗艾镜曝光系统中, xOy 平面中 $x > 0$ 半平面内,高斯光束的中心在曝光区域边缘,其强度是沿 x 轴方向递减的。但在沿 y 轴方向的任意一条直线上,光强也按照一维的高斯函数形式分布,并且曝光区域覆盖的是高斯函数中心最为“平坦”的一段,因此罗艾镜曝光的大部分光强不均匀性都是由沿 x 轴方向的光强分布不均匀导致,而沿 y 轴方向的不均匀性贡献并不显著。另一方面,从式(2)可以看出,描述挡板轮廓形状的函数 $f_1(\eta)$ 和 $f_2(\eta)$ 主要调制的是曝光量沿 y 轴方向的分布。为简化实验步骤、提高制备光栅的效率,只对光强调制系数 $M(t)$ 和挡板的移动速度 $v(x)$ 进行优化,固定挡板的形状为宽度为 a 的矩形,此时 $f_1(\eta) = 0$, $f_2(\eta) = -a$ 。当需要更精准的调控时,可以考虑将挡板轮廓形状作为优化变量,使用异形挡板对曝光量进行调控。

此外,还可以利用曝光光强和曝光时间的互补关

系进一步简化数值优化自变量的数量。在挡板扫过曝光板上一点的过程中, $v(x)$ 增大,意味着减少这一点的遮挡时间来增大曝光量,可以等效于通过提高这一点在挡板非遮挡时间内的光强来增大曝光量,即非遮挡时间内增大 $M(t)$ 。常用的步进电机平移台加速度较难精准控制,导致 $v(x)$ 难以严格按照数值优化的结果变化,因此可以设定挡板运动速度 $v(x) = v$ 为恒定值,只对光强调制系数 $M(t)$ 进行优化,而 $M(t)$ 与 $v(x)$ 的互补关系可以保证这样的简化不会损失更多的自由度。综上,式(2)的简化形式为

$$D(x, y) = I_0(x, y) \left[\int_0^{x/v} M(t) dt + \int_{(x+a)/v}^{t_3} M(t) dt \right]. \quad (4)$$

在优化计算中,只需寻找 $M(t)$ 使得曝光区域内 D_r 最小,其中式(3)中的 D_{\max} 和 D_{\min} 按照式(4)进行计算。

3 实 验

在实验中,由于曝光光束的光强并不总是严格地遵循高斯函数分布,需要先对光强分布 $I_0(x, y)$ 进行测量,才能在此基础上优化计算 $M(t)$ 。测量平面内的二维光强分布通常需要使用光电探测器进行逐点扫描,但因为曝光光束已经经过空间滤波,其光强变化是低频的,所以可以将采样的间隔放宽至 10~20 mm,通过插值计算获得曝光区域内任意点的光强。图 2(a)展示了一次实验中,在 47 mm × 46 mm 曝光区域内的归一化光强分布。由式(3)计算出在传统罗艾镜曝光系统中,曝光量不均匀性为 11.7%。从图 2(a)中还可以看出光强的等高线整体沿着 y 轴方向,这也说明了将挡板形状固定为矩形这一简化的合理性。

矩形挡板宽度 $a = 20$ mm,其移动速度 $v = 1$ mm/s,总曝光时间 $t_3 = 72$ s。对 $M(t)$ 的采样间隔为 1 s,即优化的自变量为 t 为 0、1、2、...、72 s 时刻的光强调制系数 $M(t)$,使用内点法求解使 D_r 最小的 $M(t)$ 曲线并代入式(4),得到优化后的曝光量分布如图 2(b)所示,可以看到曝光量的最大值和最小值分别出现在曝光区域的左上角和左下角附近,而光强沿 x 轴变化的趋势被基本抵消,不同区域间曝光量的差距大大缩小,曝光量不均匀性 D_r 从优化前的 11.7% 降低到了 3.07%。

一般衍射光波导采用两片光栅,通过分别耦入不同波长的光来实现全彩显示。针对这一需求,分别制备了光栅周期为 456 nm 和 329 nm 的红光和蓝光两种二维光栅波导片。对于每种周期,都用常规罗艾镜曝光系统与调控曝光量的曝光系统各制作一片波导片。在得到掩模后,采用相同的变深度离子束刻蚀^[11]和纳米压印工艺将其制备成用于增强现实显示的衍射光波

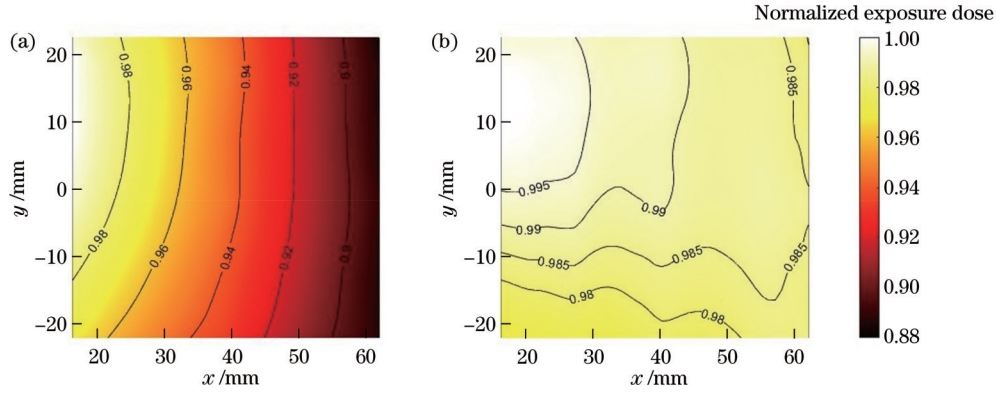


图 2 优化前后的归一化曝光量。(a)优化前;(b)优化后

Fig. 2 Normalized exposure dose distributions before and after optimization. (a) Before optimization; (b) after optimization

导,其结构与文献[7]中类似。

分别从微观和宏观两个方面验证该曝光系统对占空比均匀性的改善作用。在微观层面上,考虑到正式样品需要无损测量,使用原子力显微镜(AFM)测量二维光栅掩模占空比,将其定义为:一个周期内显影后露出基底材料的面积与整个二维光栅周期的面积之比。由于AFM的探针尺寸会引入测量误差,需要对该误差进行标定和修正。预先用AFM和扫描电子显微镜(SEM)对同一片掩模的同一位置进行测量,然后用SEM的占空比测量结果标定AFM的测量结果。光栅周期为456 nm的掩模标定如图3所示。首先从SEM图像中提取光刻胶掩模的轮廓,如图3(a)中实线轮廓所示,实线外深色区域为露出基底材

料的区域。在图3(a)中一个菱形格子(即一个二维光栅周期)内,通过计算深色基底材料区域面积与菱形总面积之比,得到掩模占空比。从AFM图像中选择一条代表掩模轮廓的等高线[图3(b)中实线轮廓],使得用该等高线计算的掩模占空比与用SEM图片计算得到的占空比相同,则该等高线就可用于确定AFM在给定周期下掩模的占空比。经过标定,在光栅周期为456 nm和329 nm的掩模的AFM图像中,占空比分别以相对高度最大值的25%和33%等高线作为掩模轮廓进行计算。完成标定后,在二维光栅掩模上,从曝光时靠近光束中心到远离光束中心以8 mm为间隔选择了5个点位,在每个点位用AFM测量其 $2\ \mu\text{m} \times 2\ \mu\text{m}$ 区域内的微观形貌。

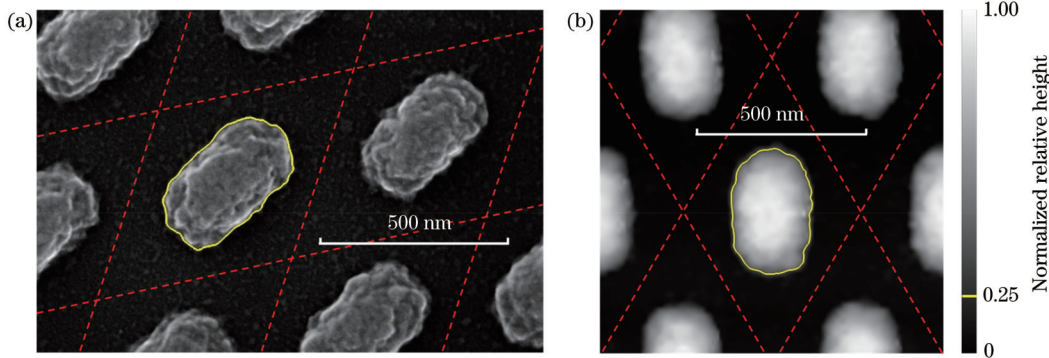


图 3 用 SEM 图像标定 AFM 测量的占空比(456 nm 周期)。(a) SEM 图像;(b) AFM 图像

Fig. 3 Calibration of duty cycle in AFM image using SEM image (456 nm period). (a) SEM image; (b) AFM image

在宏观层面上,使用经过校准的、安装了类人镜头的 CCD 相机对光波导纯红和纯蓝图片的成像分别进行拍摄和测量,以验证对成像均匀性的改善效果。如图4所示,类人镜头的入瞳直径为3 mm,与二维光栅的距离为20 mm,将镜头在 $12\ \text{mm} \times 10\ \text{mm}$ 的眼动范围内移动,均匀选取 3×3 个位置,共采集9幅成像的照片,用于计算角度均匀性和位置均匀性。

对图像均匀性的评价方法参考了文献[11]。9幅图片中每1幅子图都展示了人眼在对应的镜头位置直

观看到整幅图像的均匀性,子图中的不同点对应了不同的视场角,因此每个子图的均匀性反映了光波导的角度均匀性。对于每组图像中的第 j 幅子图,在整幅图像内均匀选取 10×10 共100个点,计算其光亮度 $L_{jk}(j=1, 2, \dots, 9; k=1, 2, \dots, 100)$,并计算光亮度平均值 $\bar{L}_j = \sum_k L_{jk} / 100$ 以及标准差系数 $V_j = \sqrt{\sum_k (L_{jk} - \bar{L}_j)^2 / 100} / \bar{L}_j$, V_j 即反映了第 j 个位置下的角度均匀性。取9幅图像 V_j 的平均值 $V_A = \sum_j V_j / 9$

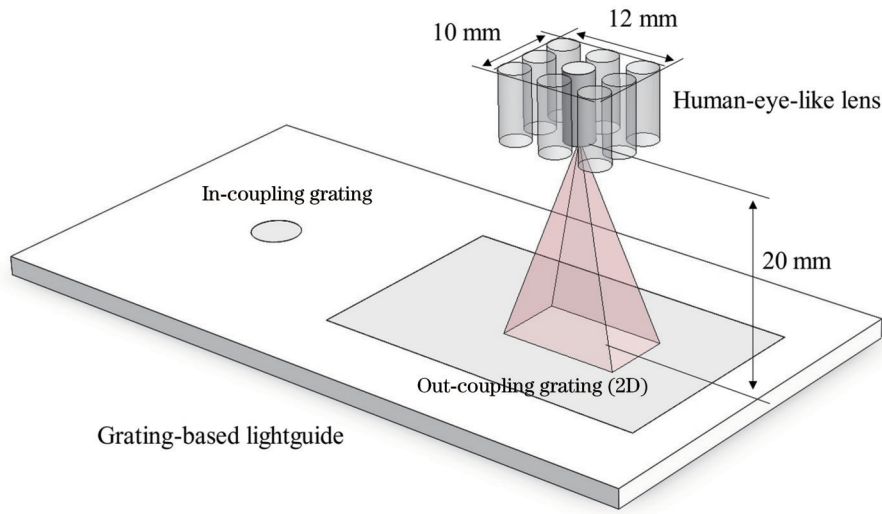


图 4 成像测试光路示意图

Fig. 4 Schematic of optical path of imaging test

作为评价总体成像角度均匀性的指标,即平均标准差系数。 V_A 越小,人眼看到的单幅图像越均匀,即角度均匀性越好。

在 9 幅图像中,每幅图像的整体亮度不同,说明人眼移动到不同位置时接收到的亮度会有变化,这反映了光波导的位置均匀性。取 \bar{L}_j 的标准差系数 $V_p = \sqrt{\sum_j (\bar{L}_j - \bar{L})^2 / 9} / \bar{L}$ 作为评价成像位置均匀性的指标。 V_p 越小,人眼在不同位置看到的图像亮度差距越小,即位置均匀性越好。

4 实验结果与讨论

二维光栅掩模的 AFM 测量结果如图 5 所示,各个点位对应的占空比数值在表 1 中给出。位置 1 到位置 5 逐渐远离光束中心。在常规罗艾镜曝光系统中,远离光束中心的位置曝光量小,因此对应的占空比小;从表 1 可看到,两种周期下光栅占空比从位置 1 到位置 5 都有明显减小的趋势,且波动较大,超出了 0.47~0.53 目标区间。而所提出的曝光系统因曝光量可调控,所制作的光栅占空比均匀性有显著改善,两种周期下占

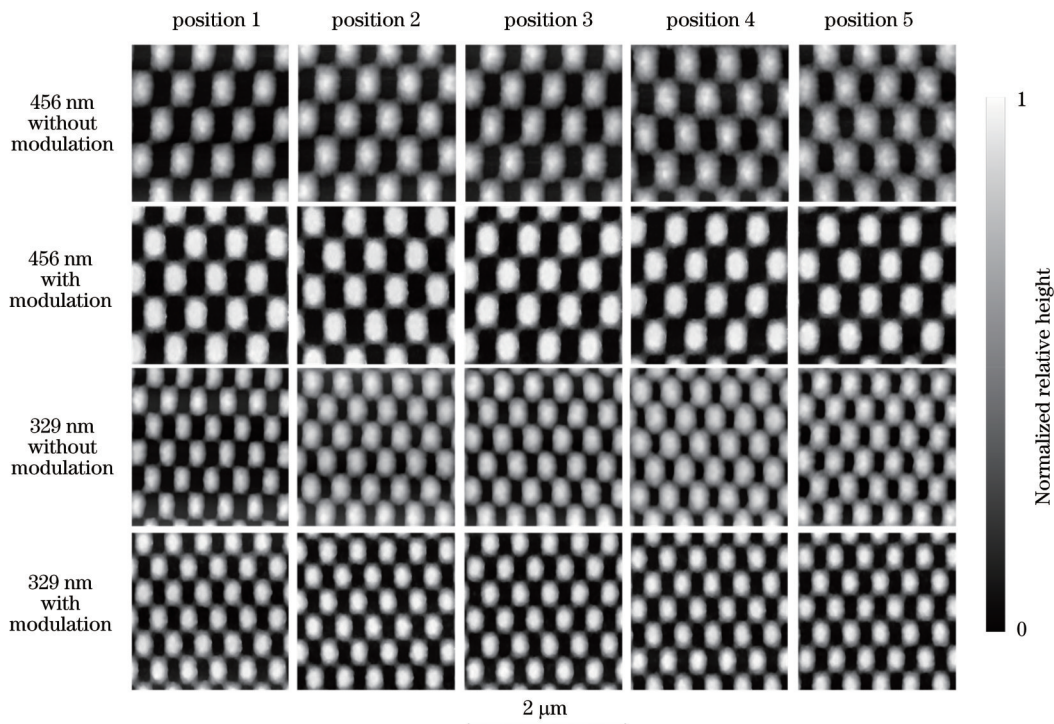


图 5 二维光栅掩模 AFM 测试结果

Fig. 5 AFM test results of 2D-grating photoresist masks

空比的极差分别降低了 66.7% 和 78.3%, 且占空比都落在了 0.47~0.53 目标区间内。

表 1 二维光栅掩模占空比
Table 1 Duty cycles of 2D-grating photoresist masks

Position	Duty cycle for 456 nm period		Duty cycle for 329 nm period	
	Without modulation	With modulation	Without modulation	With modulation
Position 1	0.52	0.49	0.53	0.47
Position 2	0.41	0.47	0.36	0.51
Position 3	0.44	0.47	0.42	0.52
Position 4	0.38	0.51	0.30	0.50
Position 5	0.34	0.53	0.34	0.51
Range	0.18	0.06	0.23	0.05
Reduction factor / %	66.7		78.3	

纯色图片的成像测试中, 测量得到的角度均匀性 V_A 以及位置均匀性 V_P 如表 2 所示。使用曝光量可控的罗艾镜曝光系统后, 红光波导片的 V_A 和 V_P 分别下降了 38.3% 和 42.9%, 蓝光波导片的 V_A 和 V_P 分别下降了 31.7% 和 59.0%, 可见成像的位置均匀性和角度均匀性都有显著改善。用手机拍摄了接近人眼直观

看到的效果图, 如图 6 所示。在成功改善占空比均匀性、使各处占空比都达到目标范围后, 从直观的成像效果即可明显看出角度均匀性有极大的改善。与未调控曝光量的图 6(a) 和 6(c) 相比, 调控曝光量的图 6(b) 和 6(d) 已经看不到明显的中心亮线。

表 2 成像均匀性指标
Table 2 Imaging uniformity indicators

Uniformity indicator	V_A for 456 nm period	V_P for 456 nm period	V_A for 329 nm period	V_P for 329 nm period
Without modulation	0.60	0.35	0.63	0.39
With Modulation	0.37	0.20	0.43	0.16
Reduction factor / %	38.3	42.9	31.7	59.0

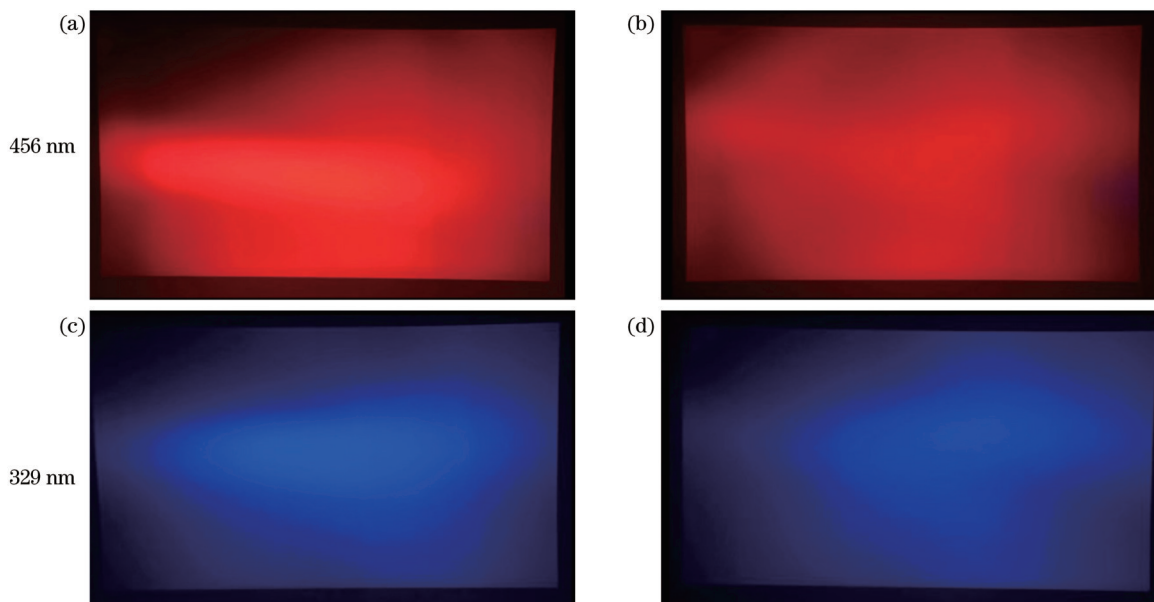


图 6 手机拍摄的纯色图片成像效果。(a)(c)未调控曝光量;(b)(d)调控曝光量

Fig. 6 Solid color imaging results captured by phone. (a) (c) Without modulation of exposure; (b) (d) with modulation of exposure

5 结 论

提出了曝光光强可控的罗艾镜曝光系统, 该系统通过移动的挡板与旋转半波片来调控待曝光基板上

不同位置处的曝光量, 以补偿全息曝光时高斯光束光强不均匀带来的占空比分布不均匀。为验证该系统的效果, 分别用该系统和传统的罗艾镜曝光系统制备了红光波导片和蓝光波导片。测量结果表明, 用该系统

制作的两款二维光栅相比传统曝光系统制作的光栅, 占空比的极差分别降低了 66.7% 和 78.3%, 成像角度均匀性的平均标准差系数分别降低了 38.3% 和 31.7%, 成像位置均匀性的标准差系数分别降低了 42.9% 和 59.0%。

在应用此曝光系统前, 光栅占空比的分布受不可控的曝光光强分布的影响, 而该系统除了实现更加均匀的占空比分布外, 也提供了精确控制占空比分布的可能, 为增强现实近眼显示的衍射光栅光波导提供更多的设计自由度, 实现更加均匀的显示效果。后续的研究中, 通过不同的光强调制曲线、不同的挡板形状, 可以调整曝光量的分布; 在一定显影条件下标定占空比与曝光量的对应关系, 就能够控制占空比的分布。此外, 该系统的曝光量调制方法可以推广到双光束干涉曝光系统中, 且在双光束系统中挡板的空间布局更加灵活, 但需要注意两束光的同步性以保证曝光对比度。

参 考 文 献

- [1] Levola T. Diffractive optics for virtual reality displays[J]. Journal of the Society for Information Display, 2006, 14(5): 467-475.
- [2] Lee Y H, Zhan T, Wu S T. Prospects and challenges in augmented reality displays[J]. Virtual Reality & Intelligent Hardware, 2019, 1(1): 10-20.
- [3] Grey D, Talukdar S. Exit pupil expanding diffractive optical waveguiding device: US10114220 B2[P]. 2018-10-30.
- [4] Ni D W, Cheng D W, Liu Y, et al. Uniformity improvement of two-dimensional surface relief grating waveguide display using particle swarm optimization[J]. Optics Express, 2022, 30(14): 24523-24543.
- [5] Wolferen H, Abelman L. Laser interference lithography[M]// Lithography: principles, processes and materials. Hauppauge: Nova Science Publishers, 2011: 133-148.
- [6] Piao J A, Li G, Piao M L, et al. Full color holographic optical element fabrication for waveguide-type head mounted display using photopolymer[J]. Journal of the Optical Society of Korea, 2013, 17(3): 242-248.
- [7] Xu C L, Zhao Y X, Zeng L J. Low-stray-light gratings fabricated with scanning exposure method based on Lloyd's mirror for a high-contrast near-eye display in augmented reality [J]. Applied Optics, 2022, 61(19): 5626-5632.
- [8] Yang Y K, Wu Y X, Lin T H, et al. Improve large area uniformity and production capacity of laser interference lithography with beam flattening device[J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9736: 97360Y.
- [9] Hung Y J, Chang H J, Chang P C, et al. Employing refractive beam shaping in a Lloyd's interference lithography system for uniform periodic nanostructure formation[J]. Journal of Vacuum Science & Technology B, Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena, 2017, 35(3): 030601.
- [10] Yao C, Cheng D W, Yang T, et al. Design of an optical see-through light-field near-eye display using a discrete lenslet array [J]. Optics Express, 2018, 26(14): 18292-18301.
- [11] 王启蒙. 增强现实眼镜中变深度二维光栅光导的设计与制作 [D]. 北京: 清华大学, 2022.
- Wang Q M. Design and fabrication of two-dimensional grating lightguides of variable profile depth for augmented reality glasses [D]. Beijing: Tsinghua University, 2022.

Exposure System for Increasing Duty Cycle Uniformity of Holographic Grating Photoresist Masks

Xu Chenlu¹, Zhao Yuxuan¹, Mao Xinyu², Zeng Lijiang^{1*}

¹State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instrument, Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

²Beijing Greater Tech Co., Ltd., Beijing 100089, China

Abstract

Objective In augmented reality near-to-eye display devices based on grating waveguides, the uniformity of grating duty cycles has a great influence on the uniformity of virtual images. In holographic exposure, the non-uniform intensity distribution of the Gaussian beam results in a non-uniform exposure dose distribution and a non-uniform duty cycle distribution. In Lloyd's mirror interferometer which is widely used in grating waveguide fabrication, the non-uniformity problem is even worse due to the setup that the center of the beam is aligned with the edge of the substrate. The main approach to this problem is to expand the beam diameter, i. e., to use only the center part of the Gaussian beam which is more uniform, but this will reduce the overall intensity and increase the exposure time. Recently, the Gaussian beam in some studies is converted to a flat-top beam by a beam shaper to increase the duty cycle uniformity. However, the flat-top beam cannot be spatially filtered, and the high-frequency noise will cause the stray light of gratings and lower the image contrast of the grating waveguide. In this study, we propose an exposure system based on Lloyd's mirror interferometer to improve the duty cycle uniformity of holographic grating masks. The system utilizes the methods of moving baffles and changing exposure intensity to compensate for the non-uniform duty cycle distribution caused by the non-uniform intensity distribution of the Gaussian beam during exposure.

Methods The exposure dose equals the integration of exposure intensity over time. Therefore, the modulation of both the exposure intensity and the exposure time can change the exposure dose distribution. The exposure intensity is adjusted by a rotating half-wave plate and a polarization beam splitter. The rotation angle of the half-wave plate is decided by the error between the pre-calculated target intensity and the real-time intensity detected by the photoelectric detector. The exposure time of each point on the substrate is modulated by a pair of moving baffles. The two baffles are placed and moved symmetrically to ensure that their shadows overlap completely, so as to keep a high exposure contrast. After the intensity distribution of the exposure beam is measured, numerical optimization is executed to obtain uniform exposure dose distribution. The objective function is the maximum exposure dose reduction percentage within the exposure area. The optimization variables are the space-varying shape of the baffles, the time-varying velocity of the baffles, and the time-varying exposure intensity. In Lloyd's mirror interferometer, a simplification is performed, and rectangular baffles and constant velocity of the baffles are used.

Results and Discussions The non-uniformity of the exposure dose is reduced from 11.7% to 3.07% after optimization (Fig. 2). Two-dimensional grating waveguides with grating periods of 456 nm and 329 nm are successfully fabricated for red and blue color displays, respectively. At the microscopic level, an atomic force microscope is used to measure the duty cycle (Fig. 5). From position 1 to position 5 (farther from the center of the Gaussian beam in order), gratings without exposure dose modulation have a decreasing duty cycle distribution, which exceeds the target duty cycle range of 0.47–0.53. The range of duty cycle of gratings fabricated in this system is decreased by 66.7% and 78.3% compared with conventional Lloyd's mirror exposure (Table 1). At the macroscopic level, the fabricated grating-based waveguides are applied in augmented reality display tests. The imaging position non-uniformity is reduced by 38.3% and 31.7%, and the angular non-uniformity is reduced by 42.9% and 59.0% (Table 2). The solid color virtual images intuitively show the imaging uniformity improvement.

Conclusions We have proposed a holographic exposure system with adjustable exposure dose distribution based on a Lloyd's mirror interferometer. The system moves baffles and rotates a half wave plate to modulate the exposure dose distribution across the substrate, so as to compensate for the non-uniform duty cycle distribution of the gratings. Grating waveguides are fabricated, and the imaging uniformity is tested to verify the system. The experimental results show that the duty cycle range is reduced by over 66% compared with conventional Lloyd's mirror exposure. The imaging uniformity is improved by over 30% when applying the fabricated grating-based waveguides to augmented reality display. Besides increasing the duty cycle uniformity, different shapes of baffles and different intensity modulation can result in different exposure dose distributions, which indicates the possibility of fabricating gratings with more complex duty cycle distributions. The method of moving baffles and rotating a half-wave plate to modulate the exposure dose distribution can also be adapted to a dual-beam interferometer.

Key words gratings; holographic exposure; duty cycle; diffractive optical waveguide; imaging uniformity