

# 基于衍射光栅和空间光调制器的点阵全息光刻方法

胡 进 浦东林 魏国军 陈林森

(苏州大学信息光学工程研究所, 江苏 苏州 215021)

**摘要** 讨论了现有各种点阵全息光刻系统的基本原理。提出了一种基于衍射光栅和空间光调制器数字微反射器(DMD)的点阵全息光刻系统和方法。实现了飞行曝光加工方式,相比现有的步进曝光方式,其加工效率和定位精度获得了大幅度的提升。基于频域分析理论讨论了影响所述光刻系统的分辨率、图形质量和焦深的主要因素。阐述了在该光刻系统中实现飞行曝光加工方式的基本原理。

**关键词** 光学制造;点阵全息;图阵全息;飞行曝光;空间光调制器

**中图分类号** O438 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0609006

## A Method of Dot-Matrix Holography Based on the Diffraction Grating and Spatial Light Modulator

Hu Jin Pu Donglin Wei Guojun Chen Linsen

(Research Institute of Optical Information and Engineering, Soochow University,  
Suzhou, Jiangsu 215021, China)

**Abstract** The working principle of the modern dot-matrix hologram lithography systems is discussed. A novel optical scheme based on the diffraction grating and high performance spatial light modulator—digital micro-mirror device (DMD) is proposed. Based on the optical scheme, a flash-on-fly working mode is realized. A much higher manufacturing efficiency and positioning precision is obtained compared with the traditional step-and-repeat working mode. The main influencing factors of the optical resolution, imaging quality and depth of focus are discussed based on the frequency domain analysis. The implementation of the flash-on-fly exposure mode is illustrated at the end.

**Key words** optical fabrication; dot-matrix hologram; image-matrix hologram; flash-on-fly; spatial light modulator

**OCIS codes** 090.1995; 220.3740; 050.1950

## 1 引 言

点阵全息作为数字全息技术的代表,广泛应用于票据证卡防伪和印刷包装产品的制作。相比其他数字全息技术,其优点在于:1) 基于彩虹全息原理,易于模压复制和大批量生产<sup>[1-2]</sup>;2) 图形处理技术成熟,易于与数字图像和三维设计等信息技术结合。

点阵全息图由具有浮雕光栅结构的像素构成,这些像素也被称为光变器件。从图案构成上看,点阵全息图具有坐标 X、坐标 Y、光栅空频(像素的颜色)、光栅转角(像素的观察方向)和像素灰度 5 个维

度的参数控制。丰富的维度表征使得点阵全息不但具有普通彩虹全息的效果,还可实现真彩色全息和动态全息等特殊效果。

目前点阵全息的主流技术有电子束光刻(EBL)和激光干涉光刻(LIL)。相比 LIL,EBL 在点阵全息的图形质量和视觉效果上具有明显优势,这主要得益于其更高的光刻分辨率和完全的图案灵活性。具体有两点<sup>[3]</sup>:1) EBL 可以通过改变光栅图形的占空比直接调控像素灰度,从而获得良好的 RGB 真彩色合成效果,而 LIL 制作的光栅结构的占空比通常

收稿日期: 2013-11-04; 收到修改稿日期: 2014-01-15

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金(20123201110020)

作者简介: 胡 进(1980—),男,硕士研究生,讲师,主要从事激光直写和全息光刻方面的研究。

E-mail: nanohujin@139.com

导师简介: 陈林森(1961—),男,博士,研究员,主要从事微纳制造和全息防伪等方面的研究。

E-mail: lschen@suda.edu.cn(通信联系人)

固定为 1:1,其像素灰度调控只能通过间接方式实现;2) EBL 制作的光栅条纹可设计为弯曲状,以此补偿不同颜色像素的色模糊角的差异,使得全息图在不同角度下观察的色彩更加稳定一致,而 LIL 制作的光栅一般只能是直纹结构,LIL 通过双光束干涉实现了光刻分辨率的倍增,设备和工艺的成本低廉。相比 EBL,其并行写入方式具有更高的加工效率,特别适合大幅面点阵全息图案的制作。

2000 年以后,空间光调制器(SLM)的引入使得点阵全息技术获得了较大的发展。首先,SLM 替代形状光阑,可以实现任意形状的像素轮廓,构图效率大幅提升。这种技术被称为图阵全息<sup>[4]</sup>。其次,位相型 SLM 可用作衍射分光器件,实现了衍射分光和像素轮廓的一体化控制。另外,位相型 SLM 的光栅周期和光栅转角可以由电控系统实现,具有很强的灵活性,成功的商业案例为波兰 Polish Holographic Systems 公司的 KineMax 光刻机<sup>[4-5]</sup>,其 SLM 采用基于液晶技术的液晶显示器(LCD)和硅基液晶(LCOS)。

目前已有的各种基于 SLM 的点阵全息光刻系统,其主要问题在于其步进加工方式运行效率低(约  $10\text{ s}^{-1}$ )而且定位精度差,目前难以有效改善。其困难在于:1) 受限于机械平台的惯性,高速的步进难以实现;2) 步进运动的起停冲击会导致震动,使得光刻图形拖影模糊,该平稳性要求限制了速度的提高,曝光时间越长、成像分辨率越高,该问题越严重;3) 在高精度和微步距的情况下,平台导轨的静摩擦给运动控制带来巨大困难。

与 EBL 相比,LIL 的像素结构相对单调,为了表征复杂的信息特征,通常采用亚像素法。在这种情况下,步进加工方式已成为光刻系统的瓶颈,另外,亚像素法对光刻质量要求也相应提高。

基于上述分析,本文提出了一种基于石英衍射光栅和高性能空间光调制器数字微反射器(DMD)的点阵全息光刻系统和方法,用以实现飞行曝光方式,同时获得良好的全息光刻质量。

典型的飞行曝光是指,平台 X 轴步进换行,Y 轴逐行扫描,扫描过程中连续进行超短脉冲曝光。扫描轴 Y 经过预定曝光位置时,由硬件电路即时触发曝光脉冲。在一行的扫描曝光过程中平台连续运动无需停顿,加工效率大幅提升。曝光脉宽一般为几十纳秒,在此曝光时段内,扫描轴的移动距离远小于系统的光学分辨率,因此不会造成‘拖影’。飞行曝光的扫描轴没有机械定位过程,曝光位置完全由

电控系统触发,因此定位精度极高(可达纳米级)。

## 2 光学系统总体方案

本系统的器件和方案选型如下:采用全固态半导体(DPSS)脉冲激光器,波长为 355 nm,脉冲宽度约 20 ns,单脉冲能量约为 0.2 mJ,激光脉冲重复频率大于 2 kHz。得益于光栅分光方式,该激光器的相干长度足以实现干涉曝光。

分光光栅采用熔石英材料,空间光调制器采用 DMD,在短波长透射率和耐功率上满足系统要求。DMD 相比基于液晶技术的 LCD 和 LCOS,图像刷新速度大幅提高(最高可达几十千赫兹),为高效光刻效率提供了技术基础。飞行曝光系统中光源曝光时间极很短、峰值功率高,基于液晶技术的 SLM 将会受到毁伤,因而无法使用。

主光路采用高微缩倍数,焦深很小。在进行大幅面曝光加工时,由于基板和平台导轨的平整度有限,必须考虑光刻系统的聚焦控制功能。为此,主光路采用无限远校正方案,末端镜头沿着光轴前后小幅移动不影响成像质量,为高性能伺服聚焦提供了便利条件。在进行聚焦控制时,只需驱动末端镜头相对光刻板浮动,相比驱动整套光路或光刻基板,其伺服精度和响应速度大幅提高。

光学系统采用两级投影光路方案,如图 1 所示。前级光路为 DMD 投影成像光路,它由 DMD、投影镜组 1、反射镜和光栅组成。DMD 为成像系统的物面,光栅面为像面,通过 DMD 的图形显示实现点阵全息像素的轮廓控制,并可实现图阵全息。该光路采用全对称  $4f$  结构,缩放倍率为 1 倍,其优点在于加工成本低、像差小。DMD 的具有二维光栅的多级衍射特性,相应地,投影镜组 1 的入瞳选择较小的数值孔径,仅接收 DMD 的闪耀级<sup>[6]</sup>,用以滤除 DMD 的栅格效应并且保证成像面光强的均匀性。

后级光路是干涉光刻的主光路,由分光光栅、投影镜组 2、频域滤波器和光刻胶表面组成,分光光栅为成像系统的物面,光刻胶表面为成像系统的像面。入射光场经过傅里叶频谱面的滤波后,在成像面上实现了双光束干涉叠加,全息图像素的条纹周期为  $d/(2M)$ ,其中  $d$  为分光光栅的周期, $M$  为成像系统的微缩倍率,典型值为 20 倍,对应数值孔径为 0.45。

由于主光路采用无限远校正光路,为了获得较大的成像视场,其严格频谱面往往位于光学系统之外,这为空间滤波带来了一定困难。为此分光光栅采用调制度为  $\pi$  的矩形位相光栅,用以实现消 0 级

光同时增强±1级光。

具体地,由于成像系统具有较高的微缩倍数,衍射光栅只需采用较低的空频,易于光刻制备。红绿蓝全息图对应的分光光栅的典型空频分别为 20、25 和 30 lp/mm。光栅采用石英基片经过涂胶、激光直写和离子刻蚀等工序制备。石英光栅的背面镀有增透减反膜,以防止±1级光经光刻胶表面和光栅背面反射后形成曝光重影。

点阵全息像素的光栅转角的控制,采用电机驱动石英分光光栅旋转实现。

点阵全息像素的光栅空频控制,采用红、绿、蓝三片石英光栅机械切换工作的方式实现。具体光刻加工时,需要根据颜色将全息图像分为红、绿、蓝三层,进行三次套刻以实现真彩色全息。特别地,当石英光栅的采用随机周期图案时,可以实现变色银的光刻效果<sup>[7]</sup>。

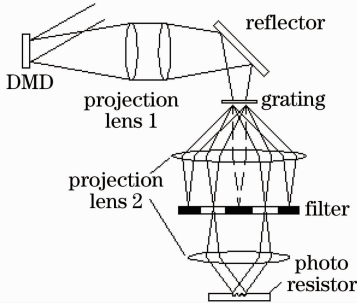


图 1 两级投影光路方案

Fig. 1 Two-stage projection optical scheme

本系统采用亚像素法实现像素灰度控制和三维立体效果<sup>[8]</sup>,支持真彩色全息和动态全息。

### 3 光学系统性能分析

在所述两级投影光路中的光栅面上,点阵全息像素的空频和轮廓实现了集成控制,根据频域分布的反演,其等效输入光场可视为图形轮廓函数与余弦振幅分布函数叠加,如图 2 所示。

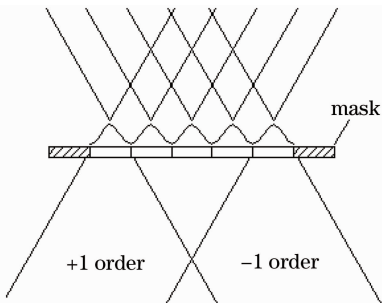


图 2 主光路的等效输入光场

Fig. 2 Equivalent input field of main optical path

光刻的分辨率取决于分光光栅的空频,并且最终受限于光学系统的数值孔径,由光学分辨率的瑞利公式可知其最小值为  $\lambda/(4NA)$ 。

光刻的图形质量,主要取决于上述图形轮廓函数与余弦振幅分布函数的叠加,也即前级光路 DMD 的投影图像与分光光栅槽形的对齐。以典型的矩形轮廓为例,当轮廓宽度为分光光栅周期  $d$  的整数倍并且边缘对齐时,其频谱分布存在两个±1级 sinc 轮廓的主峰,主峰的中心位置对应光栅空频  $1/d$ 。在高频段,±1级的 sinc 轮廓的波谷叠加相互消减,高频成分显著减小,如图 3 频域复振幅分布所示。经过投影光学系统后,图形的失真较少,模拟的光场复振幅分布如图 4(a)所示。当齐状况较差时,输出光场中的干涉曝光条纹的一致性和条纹边缘质量都有明显下降,如图 4(b)所示。当分光光栅的空频较低,并且图形轮廓尺寸较小时,上述对齐状况对光刻质量的影响更加严重。与此对比,采用位相型 SLM 作为分光器件的点阵全息光刻系统中,其衍射分光 and 图形轮廓控制是一体化的<sup>[4-5]</sup>,其光栅槽形与图形轮廓是自然严格对齐的。

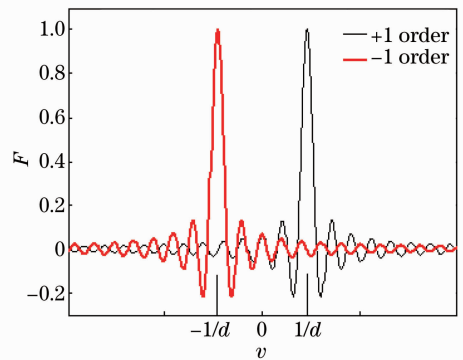


图 3 频谱面上的典型分布

Fig. 3 Typical distribution on the Fourier plan

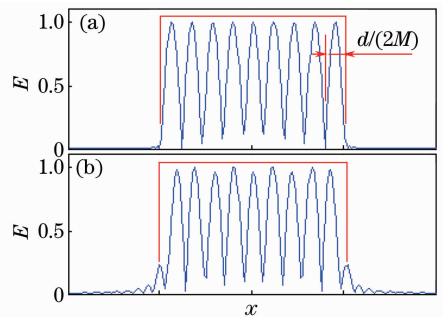


图 4 光刻主光路的输出光场对比

Fig. 4 Comparison of the output optical field

另外,当分光光栅的空频较高并且接近光学系统的带宽极限时,频域分布中的轮廓信息将会受到系统孔径的限制,由此导致光刻图形的轮廓模糊。

当图形轮廓尺寸较小,并且形状较为复杂时,该影响更加明显。

相比投影成像系统,干涉曝光系统的焦深大大增加。所述点阵全息光刻系统,同样符合这一特征,下面采用光学系统的带宽分析理论加以具体讨论。

经典的瑞利焦深公式基于点物成像模型。当点物处于最大离焦位置时,所发出球面波前相对理想波前的最大光程差为 $\lambda/4$ ,并且位于入瞳的最大孔径角方向。由此得出数值孔径较小时的焦深(DOF)近似表达式<sup>[9]</sup>

$$D_{\text{DOF}} \approx \frac{\lambda}{4} \frac{2}{1 - \cos \alpha} \approx \frac{\lambda}{\text{NA}^2}. \quad (1)$$

此外,焦深分析还可采用光栅成像模型<sup>[10]</sup>。如图5,其输入光场为矩形振幅光栅,光栅周期为 $\lambda/\sin \alpha$ ,其 $\pm 1$ 级衍射光正好沿着孔径角方向。当所述光栅位于焦深范围内时,其 $\pm 1$ 级衍射光的波前与理想波前的位相差较小(小于 $\pi/2$ ),可以与0级光在像面形成有效干涉,从而再现矩形振幅轮廓。根据频域分析理论,该模型和分析方法实质上描述了光学系统的焦深与信号带宽之间的联系,其输入光场完全可以推广至一般图形。由数学推导易知,该模型对应的焦深表达式与瑞利公式完全一致。

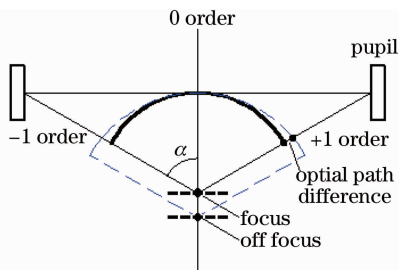


图5 光学系统焦深的带宽分析模型

Fig. 5 DOF analysis based the bandwidth model

对于理想的双光束干涉光刻系统,输出光场仅有 $\pm 1$ 级光,而没有0级光。采用上述光栅成像模型分析其波前位相差,可知其有效焦深不受限制,而覆盖整个 $\pm 1$ 级输出光束的重叠区域。其频谱分布对应 $\pm 1$ 级两条极窄的谱线。而对于点阵全息干涉光刻系统,由于输入光场的尺度受到限制,并且具有特定轮廓,其光场的频谱分布在 $\pm 1$ 级位置具有一定的带宽,由此决定了系统的焦深。近似分析如下:以红色全息图光刻为例,全息图的光栅条纹空频取为800 lp/mm,周期为 $1.25 \mu\text{m}$ ,采用矩形轮廓,其宽度取为 $100 \mu\text{m}$ ,光学系统微缩倍数为20倍。则分光光栅的周期应为 $1.25 \mu\text{m} \times 20 \times 2 = 50 \mu\text{m}$ ,式中2表示双光束干涉的倍频。而DMD投影在分光光栅面上

的矩形轮廓宽度为 $100 \mu\text{m} \times 20 = 2000 \mu\text{m}$ 。根据瑞利分辨率公式,对于355 nm的波长,光栅条纹的带宽对应的数值孔径为 $0.355 / (1.25 \times 2) = 0.142$ 。以此为参考,矩形轮廓带宽对应数值孔径估算为 $0.142 \times 20 / (2000 \mu\text{m} / 50 \mu\text{m}) = 0.071$ ,此处20为矩形轮廓的频域分布 sinc 函数所取的傅里叶级数。此级数越大,带宽越大,输出光场再现的矩形轮廓失真越小。由焦深(1)式可知系统焦深约为 $70 \mu\text{m}$ ,与光刻实验结果一致。

#### 4 控制系统方案和实验结果

飞行曝光方式已经大量应用于二轴光学加工系统,但是对于三轴以上系统难以实施。本光刻系统的运动控制系统由X-Y移动轴和光栅旋转轴 $\theta$ 三个运动轴组成。

三轴系统中,如果采用两轴步进另一轴扫描的方式,对加工效率的提升意义不大。最有价值的方案是一轴步进另两轴扫描的方式。要实现两个扫描轴同步触发曝光,存在同步问题。设想X-Y两轴同时作为扫描轴,并且需要对四个随机点(0,3)、(1,5)、(2,4)和(3,6)的进行触发曝光,当X轴扫描经过0-1-2-3时,很难实现Y轴扫描也依次同步经过3-5-4-6。

针对以上问题,基于SLM的引入,提出了一种用于点阵全息的“一轴步进两轴扫描”的飞行曝光加工方式。图6为其工作原理简图,不失一般性,图中SLM采用透射式。运动平台X轴作为步进轴,Y轴作为第一扫描轴,光栅旋转轴 $\theta$ 作为第二扫描轴。Y轴扫描时,通过控制SLM图形区域的动态移动,经过投影光学系统后,可补偿Y轴在扫描过程中相对预订曝光位置的偏移,从而实现扫描轴Y的“位置锁定”,借此等待 $\theta$ 轴扫描到位。

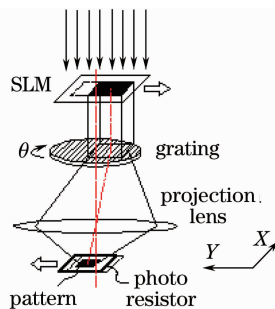


图6 SLM位置补偿原理

Fig. 6 Principle of the compensation of positioning error by SLM

这里选取光栅旋转轴 $\theta$ 作为最终触发曝光的扫描轴,主要是考虑到旋转坐标具有周期性,同时旋转

轴易于实现较高的扫描速度。这种设计确保了在  $Y$  轴的‘锁定静止’时段内,  $\theta$  轴能尽快扫描经过预定位置, 并最终触发曝光。

下面通过触发曝光的时序图详细阐述其工作原理。如图 7, 加工过程中某行存在三个预订曝光点, 其坐标  $(X, Y, \theta)$  依次分别为  $(0, 0, 120^\circ)$ 、 $(0, 4.8, 60^\circ)$  和  $(0, 10.1, 112.5^\circ)$ , 下面详述第 1 个点。

在整个加工过程中,  $\theta$  轴保持高速匀速旋转。首先,  $X$  轴步进运动到坐标  $X = 0$ , 选定扫描行。然后,  $Y$  轴移动到该行的起点  $Y = -1$ , 开始沿着  $Y$  轴正方向运动。当  $Y$  轴扫描经过预定曝光位置  $Y = 0$  之后, 每隔微小步距  $0.5 \text{ mm}$ , 运动控制器输出一个触发脉冲给 DMD, 见图 7(a)。随着  $Y$  轴前进, 投影镜头中心逐渐偏离预定曝光位置  $Y = 0$ ,  $Y$  轴位置偏差逐渐增大, 见图 7(b)。接收到触发脉冲后, DMD 显示指定的轮廓图形, 并且步进式地偏移其上的图形区域, DMD 的偏移步距与  $Y$  轴的脉冲触发间距相对应[见图 7(c)], 使得投影曝光区域跟随  $Y$  轴同步移动。此时,  $Y$  方向的曝光位置偏差保持在一个

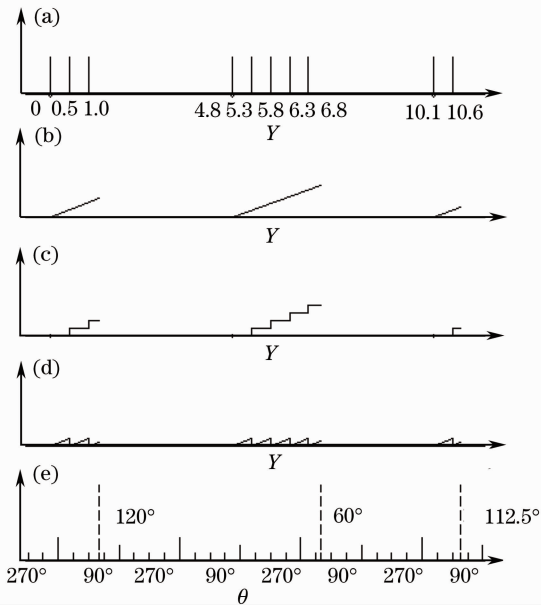


图 7 两轴位置触发曝光脉冲时序图。(a)  $Y$  轴触发脉冲; (b)  $Y$  轴位置偏差; (c) SLM 位置补偿; (d) 补偿后  $Y$  轴的位置偏差; (e)  $\theta$  轴触发脉冲

Fig. 7 Sequence chart of the two-axis position-triggered exposure. (a) Pulses triggered when predefined positions matched in  $Y$  axis; (b) positioning error in  $Y$  axis while scanning; (c) compensation of the  $Y$  positioning error by SLM according the position-triggered pulses; (d) compensated positioning error in  $Y$  axis while scanning; (e) pulses triggered by  $\theta$  axis for the final laser shot

极小值(这里是  $0.5 \text{ mm}$ )以下[见图 7(d)], 该时段内可以认为  $Y$  轴处于“静止”状态。一段时间之后,  $\theta$  轴扫描经过预定曝光位置  $\theta = 120^\circ$ , 运动控制器输出脉冲, 触发激光器完成曝光, 见图 7(e)。

具体加工效率(也即曝光频率)取决于激光器脉冲重复频率、DMD 刷新频率以及光栅轴旋转角速度, 通常光栅轴的转速是系统效率的瓶颈。具体实施中, 光栅轴的转速取为  $3000 \text{ r/min}$ , 对应光栅的重复频率为  $100 \text{ Hz}$ (注意: 分光光栅旋转的周期是  $180^\circ$ ), 由此确定飞行曝光频率为  $100 \text{ Hz}$ 。

具体实施方案如下: DMD 像素尺寸为  $13.68 \mu\text{m}$ , 图形区域宽度为  $128 \text{ pixel}$ , 偏移步距取为  $4 \text{ pixel}$ , 主光路收缩倍数为  $20$  倍。飞行曝光加工的最大定位误差为  $4 \times 13.68 \mu\text{m} / 20 = 2.736 \mu\text{m}$ 。根据前述光栅的旋转频率, DMD 的刷新频率为  $128 / 4 \times 100 \text{ Hz} = 3200 \text{ Hz}$ 。此时点阵全息的像素尺寸为  $128 \times 13.68 \mu\text{m} / 20 = 87.55 \mu\text{m}$ , 全息图像的分辨率为  $290 \text{ inch}^{-1}$ , 图形写入速度为  $0.76 \text{ mm}^2/\text{s}$ , 该光刻速度与图形的复杂程度无关。完成一幅点阵全息图像的制作, 通常需要切换红绿蓝三片光栅, 进行三次飞行曝光的套刻。显然, 提升光栅轴的转速和 DMD 的刷新频率, 系统的光刻效率还可进一步提升。

需要说明的是, 采用图阵全息技术后, 全息图像的分辨率与传统点阵全息的分辨率已经不是同一概念, 相同分辨率数值下, 前者的轮廓精细程度明显提高。

基于上述参数制作的点阵全息图的显微照片如图 8 所示。由图中可以看到点阵全息的像素定位精度高, 并且一致性好。左半图中的全息图包括绿色、蓝色和变色银三种颜色区域, 通过切换光栅多次套刻的实现。右半图是样品中某个区域的放大图, 可以看到经过成像光路干涉曝光, 色块边缘轮廓清晰, 色块之间嵌位良好。

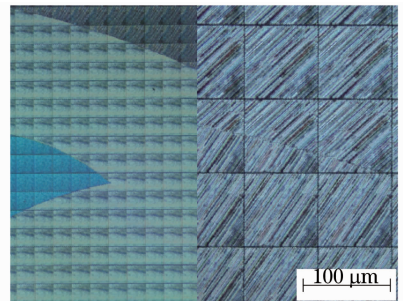


图 8 点阵全息光刻样品的显微照片  
Fig. 8 Microscope photos of the pattern of the dot-matrix hologram

## 5 结 论

提出了一种采用两级投影方案的点阵全息光刻系统,通过在衍射光栅分光干涉光路中引入空间光调制器 DMD,实现了飞行曝光加工方式,在定位精度和加工效率上获得了大幅提升。通过频域分析理论,讨论了影响所述点阵全息光刻系统的光刻图形质量和焦深的主要因素。并给出了光刻的实验结果,验证了系统的各项性能。

## 参 考 文 献

- 1 Mindaugas Andrukevicius. Methods and applications of optical holography[J]. Materials Science (Medziagotyra), 2011, 17(4): 371—375.
- 2 Zheng Huadong, Sun Guodong, Yu Yingjie. A review of holographic printing technologies[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(11): 110002.  
郑华东, 孙国栋, 于瀛洁. 全息打印技术综述[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(11): 110002.
- 3 Firsov A, Loechel B, Schleunitz A, *et al.*. Fabrication of nanoimprint stamps for rainbow holograms using SEM based e-beam lithography [C]. 33rd International Conference on Micro- and Nano-Engineering (MNE 2007), 2007. 553—554.
- 4 Rudolf L van Renesse. Security aspects of commercially available

- dot matrix and image matrix origination systems [C]. International Conference on Optical Holography and Its Applications, 2004. 1—12.
- 5 Andrejs Bulanovs, Vjacheslavs Gerbreders, Valfrids Paschkevich, *et al.*. Dot-matrix holographic recording in amorphous chalcogenide films[J]. SPIE, 2007, 6596: 65960K.
- 6 Chen Xiao, Yan Binbin, Song Feijun, *et al.*. Diffractive properties of DMD gratings and its new application in tunable fiber lasers[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(7): 0705003.  
陈 笑, 颜玢玢, 宋菲君, 等. DMD 光栅的衍射特性及其在可调谐激光中的应用[J]. 光学学报, 2012, 32(7): 0705003.
- 7 Zhou Xiaohong, Chen Linsen, Shao Jie, *et al.*. Design and fabrication for achromatic optical variable device [J]. Acta Photonica Sinica, 2006, 35(11): 1701—1704.  
周小红, 陈林森, 邵 洁, 等. 消色散光变图像的二元光学设计与制作方法[J]. 光子学报, 2006, 35(11): 1701—1704.
- 8 Wei Guojun, Pu Donglin, Hu Jin, *et al.*. A Micro Three-Dimensional Optical Grating Sub-Pixel Image and Its Production Method[P]. China, ZL 201010238377. [2012-02-15].  
魏国军, 浦东林, 胡 进, 等. 一种微光栅亚像素三维光学图像及其制作方法[P]. 中国, ZL201010238377. [2012-02-15].
- 9 Born M, Wolf E. Principles of Optics[M]. 6th edition. Oxford: Pergamon Press, 1980.
- 10 Chris A Mack. Field Guide to Optical Lithography[M]. SPIE Publications, 2006. 75—76.

栏目编辑:何卓铭