

文章编号 1004-924X(2018)03-0531-10

工作台各速度段激光直写二元图案

张 山^{1*}, 王 雷², 吕英俊¹

(1. 山东科技大学 电气信息系, 山东 济南 250031;

2. 哈尔滨工业大学 超精密光电仪器工程研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 为了进一步提高直角坐标激光的直写效率, 提出了一种扫描工作台各速度段进行激光直写二元图案的方法。该方法用扫描工作台的位置反馈脉冲同步触发激光束曝光光刻胶, 实现像素点的理想位置曝光; 而且依据扫描工作台的运动特性和匀速直写时各像素点获得的曝光量情况, 对处于扫描工作台加、减速度段的像素点的曝光强度进行调制, 保证需要曝光的像素点对应的每一个位移分辨率距离上所获的曝光量与扫描工作台匀速运动时相同, 从而保证扫描工作台速度连续变化的情况下激光直写能获得预期的曝光效果。仿真实验表明: 以 5 mm×5 mm 曝光图案为例, 该方法所需的直写时间是传统只在匀速段直写的 77.77%; 同时配备的声光调制器由 16 位降为 12 位时, 扫描工作台整个加速段直写产生的曝光量相对误差由 0.4% 上升为 10%。

关键词: 激光直写; 二元图案; 方形平顶激光束; 曝光强度调制; 直写效率

中图分类号: TN249 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20182603.0531

Laser direct writing for binary patterns during accelerating and decelerating motion of scanning stage

ZHANG Shan^{1*}, WANG Lei², LÜ Ying-jun¹

(1. Department of Electrical Engineering & Information Technology, Shandong University of Science & Technology, Jinan 250031, China;

2. Institute of Ultra-precision Optical & Electronic Instrument Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

* Corresponding author, E-mail: zhangshan212@163.com

Abstract: In order to further improve the efficiency of laser direct writing (LDW) in Cartesian coordinates, the exposure process was proposed to proceed in the accelerating and decelerating sections of the scanning stage, while the exposure effect was guaranteed by the following two ways. The pixel exposure data stored in a line buffer were clocked out by the position feedback pulses during the line scan, driving the acousto-optic modulator to obtain the corresponding beam intensity at the exact desired position. According to the kinetic characteristic of scanning stage, the necessary exposure data under uniform motion and minimum exposure intensity, and exposure data of each pixel in the accelerating and decelerating sections of the scanning stage, are modulated to make the distance of each displacement resolution in it exposed as much dose as that in uniform sections. Numerical

收稿日期: 2017-08-10; 修订日期: 2017-09-15.

基金项目: 山东省自然科学基金资助项目 (No. ZR2014FQ020); 国家自然科学基金资助项目 (No. 61471224)

simulations indicate that, considering an exposure pattern within a $5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ area as an example, the total exposure time with the proposed method is 77.77 % of that with exposure only during the scanning stage moving at a constant speed. Meanwhile, the relative error of the exposure dose is increased from 0.4 % to 10 % when the bit of the acousto-optic modulator is decreased from 16 to 12.

Key words: laser direct writing; binary pattern; square top-hat laser beam; exposure intensity modulation; direct writing efficiency

1 引言

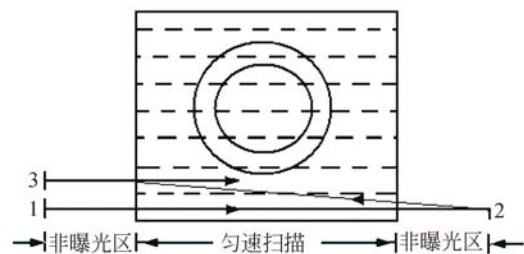
激光直写技术可用于加工任意图案的衍射微结构光学元件和集成电路掩模版等^[1-9]。随着微结构衍射光学向着大口径及阵列化方向发展,对激光直写技术的效率和精度提出了更高的要求。曝光是激光直写技术的一个重要环节,其基本原理是用计算机控制高精度激光束扫描基片表面的光刻胶进行变剂量曝光,从而控制光刻胶内曝光量的分布情况。曝光量是曝光强度与曝光时间的乘积,使光刻胶在显影后完全溶解所需要的最低曝光量称为曝光阈值。因此,直写曝光光刻胶的过程对元件的加工效率和精度有很大影响。现有的激光直写曝光装置的工作平台主要有直角坐标^[10]和极坐标^[11]两种方式,其中直角坐标方式的工作台一般由行间定位平台和扫描工作台组成,分别实现对基片的扫描行间定位和扫描行曝光,适合加工任意图形,因此应用最为广泛。在这种结构中,为了获得均匀的曝光效果,扫描工作台只在匀速运动情况下进行曝光直写^[9,12-14],在加速和减速过程中对基片上的光刻胶不曝光。

在保证直写质量的前提下,为了进一步提高直写效率,本文针对用强度均匀的方形平顶激光束对光刻胶进行直写曝光的情况,提出了一种扫描工作台各速度段进行激光直写二元图案的方法。该方法实施的前提是将直写图案规划成由许多与直写光斑尺寸等大的网状像素点叠加的离散化图案,然后用扫描工作台的位置反馈脉冲同步触发激光束曝光光刻胶,实现像素点的理想位置曝光;并且通过调制处于扫描工作台加、减速度段的像素点的曝光强度,来保证需要曝光的像素点对应的每一个位移分辨率距离上所获的曝光量与扫描工作台匀速运动时相同,从而保证在扫描工作台速度连续变化的情况下激光直写能获得预期的曝光效果。该方法使得激光直写二元图案的过

程不仅可以在扫描工作台匀速运动时进行,也可以在加速运动或者减速运动时进行,提高了激光直写的效率。

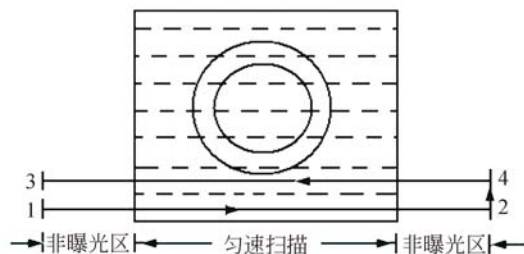
2 传统激光直写方式

现有的激光直写方式^[13-14]如图 1 所示。图 1(a)中,纵向为定位工作台移动定位轨迹,横向为扫描工作台扫描轨迹,该轨迹包括扫描前距和扫描后距两个非曝光区,以及用于直写的匀速扫描曝光区。扫描前距主要是使工件台的扫描速度从零加速到所设定的值,以使光刻胶基片在该扫描速度下进行曝光;扫描后距主要是曝光扫描速度值从设定减至为零所需要的距离。然后扫描工作台回迹到下一行的扫描起始点,重复进行扫描动作。图 1(b)中直写曝光方式与图 1(a)相似,扫描



(a) 单向直写

(a) LDW in one-way manner



(b) 双向直写

(b) LDW in a bidirectional manner

图 1 激光直写方式

Fig. 1 Schematic of Laser Direct Writing (LDW)

行包括了非曝光区和匀速扫描曝光区,不同的是可以双向曝光直写,提高了直写效率。显然,现有的两种方法在扫描工作台加速运动和减速运动段都没有进行激光直写。

3 理论分析

为了进一步提高直写效率,针对用强度均匀的方形平顶激光束对光刻胶进行直写曝光的情况,本文提出了一种扫描工作台各速度段进行激光直写二元图案的方法。该方法充分利用扫描工作台的加、减速段进行直写曝光,节省了直写时间。理想的方形平顶激光束二维光强分布如图 2 中实线所示,光斑各处光强相等,而实际上方形平顶激光束的光强分布如图 2 中虚线所示,在光束的边缘光强分布存在一定的锥度^[15]。因此,如果在加速段或减速段按照匀速直写时的曝光量对光刻胶进行曝光,势必导致曝光时间增加,同时光刻胶上的曝光量增加,从而影响直写线宽。因此为了保证不同速度段的曝光效果一致,必须对曝光强度数据进行调制。

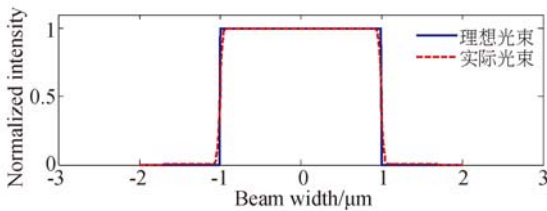


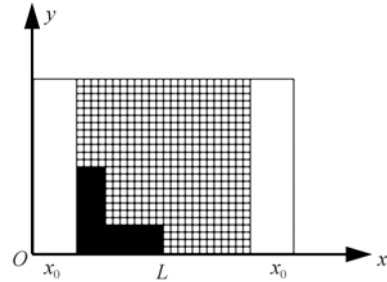
图 2 方形平顶激光束的二维光强分布

Fig. 2 2D intensity distribution of square top-hat beam

3.1 各速度段进行激光直写的方法

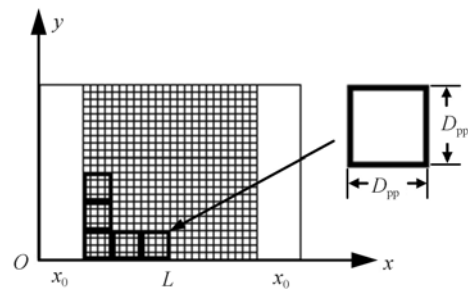
为了简化问题,探讨以理想的方形平顶激光束在扫描工作台加速段或减速段进行激光直写时的方法。同时,为了方便讨论,如图 3 所示定义如下仿真条件:分别以直角坐标激光直写系统二维工作台中的扫描工作台和行间定位平台作为直写坐标系的 x 轴和 y 轴, x_0 为非曝光区长度,代表直角坐标激光直写机沿其扫描工作台方向不能进行曝光直写的初始和末端的最小长度, L 为待加工元件在扫描直写曝光方向上的尺寸;图中栅格代表曝光图案的空间离散化,栅格的边长为定位和扫描工作台的位移分辨力,栅格的交点是曝光图案的采样点;图 3(a)中黑色部分是待直写的理想二元图案,它由直写光点叠加而成,如图 3(b)

所示,直写光点为边长为 D_{pp} 的小正方形。因此,二元图案在直写前需要规划成由许多与直写光斑尺寸等大的网状像素点叠加的离散化图案,各像素点的位置用其起始边界坐标表示,并假定 L 始终是边长 D_{pp} 的整数倍。



(a) 理想二元图案

(a) Desired binary pattern



(b) 直写光点扫描曝光

(b) Focused spots scanned to form pattern

图 3 直角坐标激光直写技术图案示例

Fig. 3 Simulation schematic of LDW in Cartesian coordinate

经研究分析,本文提出了扫描工作台各速度段进行激光直写二元图案时直写光斑曝光强度数据的调制方法,如图 4 所示。该方法由五步实现,同时假定待加工元件在二维空间上的二元图像沿水平和垂直方向已处理成由许多与直写光斑尺寸等大的网状像素点叠加的离散化图案,像素点各边长均为 D_{pp} ,扫描工作台以匀速 v_{con} 运动时每个像素点对应的曝光时间 T 和曝光强度 I_{cv} 也是已知条件。由于光刻胶上曝光量的分布是胶层内获得高质量图案轮廓的必要条件,因此,调制的目标是在扫描工作台变速运动时使需要曝光的像素点对应的扫描方向上的每一个位移分辨力距离上所获得的曝光量与扫描工作台匀速运动时相同,这里的位移分辨力是扫描工作台位移传感器能检测

的最小距离,而且这个位移分辨率通常比需要曝光的像素点小很多。

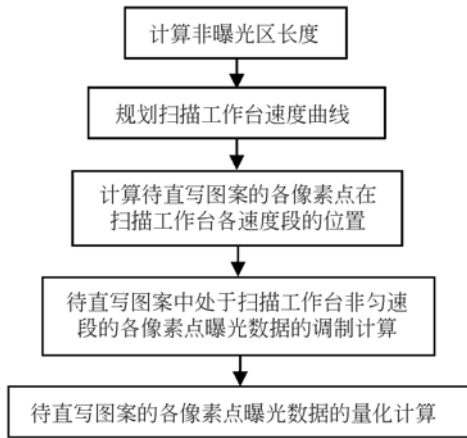


图 4 曝光强度数据调制流程

Fig. 4 Flow chart of exposure data modulation

第一步,计算非曝光区长度 x_0 。

这里假定直写系统中扫描工作台的加速度和减速度相同,则直角坐标激光直写机沿其扫描工作台方向上的初始和末端两段非曝光区的长度是相等的,因此只计算扫描工作台加速段的非曝光区长度。根据上面提到的调制目标和扫描工作台的运动学特征, x_0 可由方程组(1)求解。

$$\begin{cases} I_{cv} \cdot \Delta T = I_{pb} \cdot \Delta t \\ v_{st} \cdot \Delta t + \frac{1}{2} a \cdot \Delta t^2 = S_{pp} \\ v_{st}^2 - 0^2 = 2ax_0 \end{cases} \quad (1)$$

其中: $\Delta T = S_{pp} / v_{con}$ 是传统直写方法中扫描工作台以匀速 v_{con} 动一个位移分辨率 S_{pp} 所需要的时间, I_{pb} 是用声光调制器最小分辨率调制的曝光强度, Δt 是以光强 I_{pb} 曝光光刻胶且曝光效果与光强 I_{cv} 曝光光刻胶 ΔT 时间一样所需要的时间, v_{st} 为直写曝光开始时扫描工作台的最小速度, a 为扫描工作台加速运动时的加速度,为恒定值。

方程组(1)中,第一个方程是本方法的调制目标,该方程左侧是传统直写方法中扫描工作台以匀速 v_{con} 运动时,光刻胶上一个位移分辨率 S_{pp} 长度上所获得的曝光量;右侧是扫描工作台加速段进行激光直写时要达到与匀速直写相同效果所需要的相关参数。第二个和第三个方程是扫描工作台的运动学方程。

简单分析可知,在方程组(1)第二个方程中,

Δt 越大, v_{st} 越小以至于为0,但是不能是负值;如果求解得到的 $v_{st} < 0$,说明方程组(1)第一个方程中 I_{pb} 足够小使得 Δt 足够大,这时可以通过增加加速段直写光束的光强来降低 Δt ,从而使 $v_{st} = 0$ 。在方程组(1)第三个方程中,当 $v_{st} = 0$ 时, x_0 也为0,此时激光直写过程可以从扫描工作台静止开始进行。

综上所述,当方程组(1)求解得到的 $v_{st} \leq 0$ 时, x_0 可以为0,即激光直写过程可以从扫描工作台静止开始进行,而不需要加速到一定速度再进行直写曝光;当方程组(1)求解得到的 $v_{st} > 0$ 时, x_0 不为0,此时求得:

$$x_0 = \frac{S_{pp}^2 I_{pb}^2}{2a \cdot I_{cv}^2 \cdot \Delta T^2} + \frac{a \cdot I_{cv}^2 \cdot \Delta T^2}{8 I_{pb}^2} - \frac{S_{pp}}{2} \quad (2)$$

当 x_0 不是扫描工作台位移分辨率的整数倍时,将其不足位移分辨率的部分圆整为一个位移分辨率,使最终的非曝光区长度 x_0 为扫描工作台位移分辨率的整数倍。此时扫描工作台需要加速运行 x_0 长度后才能开始直写曝光过程。基于上述结论,如果直写系统中的声光调制器的位数是可调整的,为了使直写系统的非曝光区长度为0,此时可以根据方程组(1)通过 $v_{st} = 0$ 来反推方程组中 I_{pb} 的最大值,再根据直写光束被声光调制器调制前的最大光强,很容易推导出此时对应的声光调制器 D/A 转换器位数的最小值。

第二步,规划扫描工作台的速度曲线。

扫描工作台的速度曲线规划主要是判断扫描工作台需不需要匀速运动,这需要根据扫描工作台扫描行两端各自的非曝光区长度 x_0 、待加工元件在扫描直写曝光方向上的尺寸 L 以及扫描工作台的加速度 a 来规划,其中扫描工作台加速段和减速段的加速度都为 a 且始终保持不变。同时假定传统直写曝光时扫描工作台匀速运动的速度 v_{con} 为该系系统稳定地进行直写运动的速度上限。在图3所示的坐标系下,根据扫描工作台的运动特性容易计算求得其加速段和减速段的有效曝光距离之和 x_{sum} ,即 $x_{sum} = 2(v_{con}^2 / 2a - x_0)$ 。

如果 $x_{sum} \geq L$,说明扫描工作台不需要匀速运动过程就能完成对待加工图案的直写曝光,设扫描工作台需要达到的最大速度为 v_{max} ,而扫描工作台从静止到达该速度时的距离 d 为: $d = x_0 + L/2$,

则根据运动方程 $v_{\max}^2 - 0^2 = 2a(x_0 + L/2)$ 可求得 $v_{\max} = \sqrt{2a(x_0 + L/2)}$, 此时扫描工作台的速度曲线如图 5 所示, 即扫描工作台工作时以加速度 a 加速运动, 当速度达到 v_{\max} 时, 再以加速度 a 减速运动直到扫描工作台速度为零。

如果 $x_{\text{sum}} < L$, 说明扫描工作台需要进行匀速运动才能完成对待加工图案的直写曝光, 也就是说扫描工作台的最大速度为 v_{con} , 此时扫描工作台的速度曲线如图 6 所示, 即扫描工作台工作时以加速度 a 加速运动, 当速度达到 v_{con} 时再匀速运动 $(L - x_{\text{sum}})$ 距离, 然后以加速度 a 减速运动直到扫描工作台速度为零。

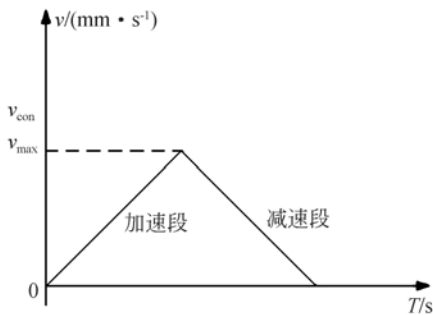


图 5 无匀速段速度曲线

Fig. 5 Velocity curve without uniform velocity

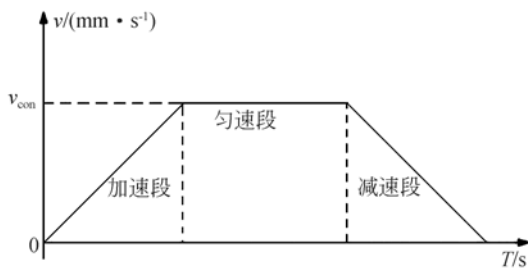


图 6 有匀速段速度曲线

Fig. 6 Velocity curve with uniform velocity

第三步, 计算待直写图案各像素点在扫描工作台各速度段的位置。

在图 3 所示的坐标系下计算待直写图案各像素点的位置, 包括每一个像素点所处的速度段及其靠近扫描起始方向的起始边界坐标。

当扫描工作台的速度曲线如图 5 所示时, 其加速段与减速段的长度相等, 非曝光区存在对称性, 因此, 只需推算出加速段对应的待直写图案的像素点个数。由第二步可知, 此种情况下, 加速段对应的直写长度为 $L/2$, 而像素点的边长为 D_{pp} ,

因此前者除以后者便可得到加速段对应的待直写图案的像素点个数, 设所得商的整数部分为 Q 。如果所得商没有小数部分, 则扫描行上从直写曝光起点到曝光终点只有依次对应的加速段、减速段的像素个数, 均为 Q ; 如果所得商有小数部分, 则扫描行上从曝光起点到曝光终点只有依次对应加速段、同时处于加速段和减速段、减速段的像素个数, 分别为 $Q, 1, Q$ 。

当扫描工作台的速度曲线如图 6 所示时, 其加速段与减速段和非曝光区也存在对称性, 同时直写过程中存在匀速段。因此加速段对应的直写长度为 $x_{\text{sum}}/2$, 该值除以像素点的边长 D_{pp} 即为加速段对应的待直写图案的像素点个数。设所得商的整数部分为 Q , 如果所得商没有小数部分, 则加速段对应的像素点数为 Q , 扫描行上从直写曝光起点到曝光终点只有依次对应加速段、匀速段、减速段的像素个数, 分别为 $Q, (L/D_{pp} - 2Q), Q$; 如果所得商有小数部分, 则扫描行上从直写曝光起点到曝光终点只有依次对应加速段、同时处于加速段和匀速段、匀速段、同时处于匀速段和减速段、减速段的像素个数, 分别为 $Q, 1, (L/D_{pp} - 2Q - 2), 1, Q$ 。

扫描工作台以上述两种速度曲线运动, 扫描行上从直写曝光起点到曝光终点方向上第 i 个像素的起始边界坐标值 x_i 按照公式 $x_i = x_0 + (i-1) \cdot D_{pp}$ 计算, 其中 $i = 1, 2, 3 \dots L/D_{pp}$ 。

第四步, 扫描工作台非匀速段待直写图案各像素点曝光数据的调制计算。

在上述三步获得的相关参数的基础上, 该步骤主要是对边界全部或部分位于非匀速段的像素点的曝光数据进行调制, 调制的目标是在扫描工作台变速运动时使需要曝光的像素点对应的扫描方向上每一个位移分辨率距离上所获得的曝光量与扫描工作台匀速运动时相同。根据像素点所处的速度段, 可分为 5 种情况进行曝光数据调制: (1) 边界全部位于加速段; (2) 边界全部位于减速段; (3) 一部分边界位于加速段, 一部分边界位于减速段; (4) 一部分边界位于加速段, 一部分边界位于匀速段; (5) 一部分边界位于匀速段, 一部分边界位于减速段。其中, 第 (1), (2), (3) 种情况下扫描工作台的速度曲线如图 5 所示; 第 (1), (2), (4), (5) 种情况下, 扫描工作台的速度曲线如图 6 所示。调制计算之前, 首先需要计算单个激光点在

扫描工作台匀速运动情况下直写的畸变长度及其对应的位移分辨力个数,这很容易根据扫描工作台匀速直写时的速度 v_{con} 、像素点曝光时间 T 以及位移分辨力 S_{pp} 计算得到,即 $n = \lceil v_{\text{con}} T / S_{\text{pp}} \rceil$,这里 n 表示扫描工作台以匀速 v_{con} 对像素点进行 T 时间曝光时引起的直写光点在扫描方向上的畸变长度对应的位移分辨力个数,方括号表示对计算结果进行四舍五入取整。然后需要计算 5 种情况下,对于每个像素点来说,从其起始边界开始扫描工作台经过 n 个位移分辨力所需要的 n 个时间段。最后依据调制目标列写曝光量方程求得上述 n 个位移分辨力各自对应的曝光强度数据。

单个直写光点在扫描方向上的畸变长度对应的 n 个时间段可依据扫描工作台的运动特性进行求解,按像素点的位置分以下 5 种情况进行讨论。

(1) 边界全部位于加速段时,畸变长度对应的 n 个时间段依据方程组(3)求解。

$$\begin{cases} x_{ij} = x_0 + (i-1)D_{\text{pp}} + (j-1)S_{\text{pp}} \\ v_{ij}^2 - 0^2 = 2ax_{ij} \\ v_{ij} \cdot \Delta t_{ij} + 0.5 \cdot a \cdot \Delta t_{ij}^2 = S_{\text{pp}} \end{cases}, \quad (3)$$

其中: x_{ij} 表示沿扫描方向第 i 个像素点的起始边界开始的第 j 个位移分辨力的起始边界坐标, v_{ij} 表示与 x_{ij} 位置对应的扫描工作台的速度, Δt_{ij} 为待求量,表示扫描工作台通过以 x_{ij} 为起始边界的一个位移分辨力所需要的时间, $i = 1, 2, 3, \dots, L/D_{\text{pp}}, j = 1, 2, \dots, n$ 。其余参数含义与前述相同。

(2) 边界全部位于减速段时,畸变长度对应的 n 个时间段依据方程组(4)求解。

$$\begin{cases} x_{ij} = x_0 + (i-1)D_{\text{pp}} + (j-1)S_{\text{pp}} \\ v_{ij}^2 - 0^2 = 2a(L + 2x_0 - x_{ij}) \\ v_{ij} \cdot \Delta t_{ij} - 0.5 \cdot a \cdot \Delta t_{ij}^2 = S_{\text{pp}} \end{cases}, \quad (4)$$

其中该方程组各参数含义与式(3)相同。

(3) 一部分边界位于加速段,一部分边界位于减速段时,这种情况只存在于扫描工作台无匀速段的条件下,如图 5 所示,且只有 1 个像素点。依据方程组(5)先求解扫描方向上第 $Q+1$ 个像素点位于加速段的长度 d_{acc} 。如果 $d_{\text{acc}}/S_{\text{pp}} \geq n$,则该像素点曝光光强的调制方法按照情况(1)进行;如果 $d_{\text{acc}}/S_{\text{pp}} < n$,对 $d_{\text{acc}}/S_{\text{pp}}$ 的小数部分四舍五入取整,设取整后其值为 m ,则从该像素点起始曝光边界开始的 m 个位移分辨力对应的曝光光强调制方法按照情况(1)进行,紧接着的 $(n-m)$ 个位移分辨

力对应的曝光强度调制方法按照情况(2)进行,其中 $x_{ij} = x_0 + Q \cdot D_{\text{pp}} + (j-1) \cdot S_{\text{pp}}, j = (m+1), (m+2), \dots, n$ 。

$$\begin{cases} x_{Q+1} = x_0 + Q \cdot D_{\text{pp}} \\ v_{Q+1}^2 - 0^2 = 2ax_{Q+1} \\ v_{\text{max}}^2 - v_{Q+1}^2 = 2ad_{\text{acc}} \end{cases}, \quad (5)$$

其中: x_{Q+1} 表示扫描方向上第 $Q+1$ 个像素点的起始边界坐标, v_{Q+1} 表示与 x_{Q+1} 位置对应的扫描工作台的速度。

(4) 一部分边界位于加速段,一部分边界位于匀速段时,这种情况只存在于扫描工作台存在匀速段的条件下,如图 6 所示,且只有 1 个像素点。依据方程组(6)先求解扫描方向上第 $Q+1$ 个像素点位于加速段的长度 d_{acc} 。如果 $d_{\text{acc}}/S_{\text{pp}} \geq n$,则该像素点曝光光强的调制方法按照情况(1)进行;如果 $d_{\text{acc}}/S_{\text{pp}} < n$,对 $d_{\text{acc}}/S_{\text{pp}}$ 的小数部分四舍五入取整,设取整后其值为 m ,则从该像素点起始曝光边界开始的 m 个位移分辨力对应的曝光光强调制方法按照情况(1)进行,紧接着的 $(n-m)$ 个位移分辨力对应的曝光强度数据被赋予该像素点未调制前的曝光强度。

$$\begin{cases} x_{Q+1} = x_0 + Q \cdot D_{\text{pp}} \\ v_{Q+1}^2 - 0^2 = 2ax_{Q+1} \\ v_{\text{con}}^2 - v_{Q+1}^2 = 2ad_{\text{acc}} \end{cases}, \quad (6)$$

其中该方程组各参数含义与式(5)相同。

(5) 一部分边界位于匀速段,一部分边界位于减速段时,这种情况只存在于扫描工作台存在匀速段的条件下,如图 6 所示,且只有 1 个像素点。同时由于速度曲线的对称性,情况(5)对应的像素点与情况(4)下的像素点的运动特性参数具有一致性,即两像素点位于匀速段的长度相等,都为 $d_{\text{con}} = D_{\text{pp}} - d_{\text{acc}}$ 。那么如果 $d_{\text{con}}/S_{\text{pp}} \geq n$,则从该像素点起始曝光边界开始的 n 个位移分辨力对应的曝光光强被赋予该像素点未调制前的曝光强度;如果 $d_{\text{con}}/S_{\text{pp}} < n$,对 $d_{\text{con}}/S_{\text{pp}}$ 的小数部分四舍五入取整,设取整后其值为 m ,则从该像素点起始曝光边界开始的 m 个位移分辨力对应的曝光光强被赋予该像素点未调制前的曝光强度,紧接着的 $(n-m)$ 个位移分辨力对应的曝光强度调制方法按照情况(2)进行,其中 $x_{ij} = x_0 + (L/D_{\text{pp}} - Q - 1) \cdot D_{\text{pp}} + (j-1) \cdot S_{\text{pp}}, i = L/D_{\text{pp}} - Q - 1, j = (m+1), (m+2), \dots, n$ 。

以上 5 种情况下单个直写光点在扫描方向上

的畸变长度对应的 n 个时间段求解完成后,依据调制目标列写曝光量方程(7),则单个直写光点在扫描方向上的畸变长度对应的 n 个位移分辨力的曝光强度数据可求解。

$$I_{cv} \cdot \Delta T = I_{ij} \cdot \Delta t_{ij}, \quad (7)$$

其中 I_{ij} 为沿扫描方向第 i 个像素点的起始边界开始的第 j 个位移分辨力所对应的曝光强度,其余各参数含义与前述相同。

第五步,待直写图案各像素点曝光数据的量化计算。

在第四步的基础上,依据公式 $D_{ij} = [I_{ij}/I_{pb}]$ 计算非匀速段各个像素点的曝光强度对应的声光调制器 D/A 转换器所需的数字量 D_{ij} ; 依据公式 $D_i = [I_i/I_{pb}]$ 计算匀速段各个像素点的曝光强度对应的声光调制器 D/A 转换器所需的数字量 D_i , 其中 I_{pb} 是用声光调制器最小分辨力调制的曝光强度,方括号表示四舍五入取整。

3.2 各速度段进行激光直写方法误差和效率分析

针对前一节提到的各速度段进行激光直写的方法,本文从理论上讨论了该方法产生的误差以及直写效率的提高程度。

3.2.1 理论误差分析

各速度段进行激光直写的方法所产生的误差主要包括两次量化过程引起的舍入误差,即以扫描工作台位移分辨力为单位量化直写光点畸变长度产生的舍入误差,和以声光调制器分辨力调制的曝光强度为单位量化各像素点曝光数据产生的舍入误差。前者会导致沿直写扫描方向的曝光区域有一定误差,根据基于四舍五入原则进行量化计算的公式 $n = [v_{con} T/S_{pp}]$ 可知,曝光区域误差范围为 $[-\frac{1}{2}S_{pp}, \frac{1}{2}S_{pp}]$, 由于工作台的位移分辨力 S_{pp} 一般比直写光点小一到两个数量级,所以此项误差可以忽略。同时可以看出, S_{pp} 越小,此项误差越小;但是当直写速度一定时, S_{pp} 越小,变速段调制光强的频率要求越高,这要求配备更高性能的声光调制器。其次,畸变长度量化误差对相应的直写像素点的曝光量有一定的影响,根据前述变速段曝光数据的调制方法,畸变长度量化误差导致的曝光量误差范围为 $[-\frac{1}{2}I_{cv} \cdot \frac{S_{pp}}{v_{con}},$

$\frac{1}{2}I_{cv} \cdot \frac{S_{pp}}{v_{con}}]$, 由于 I_{cv} 和 v_{con} 为直写系统的特征参数,一般保持不变,所以这里影响该误差的是扫描

工作台的位移分辨力 S_{pp} 。 S_{pp} 越小,畸变长度量化误差导致的曝光量误差越小,不过受声光调制器性能的影响, S_{pp} 不易过小。

此外,如果系统直写参数允许,可以同时调整匀速直写时直写光点的曝光强度 I_{cv} 和曝光时间 T ,使直写光点畸变长度为位移分辨力的整数倍,此时畸变长度的量化误差为零,这就使得其产生的曝光区域误差和曝光量误差都为零。

各速度段进行激光直写所产生的另一项误差,即以声光调制器分辨力调制的曝光强度为单位量化各像素点曝光数据产生的舍入误差,此项误差直接导致直写光点曝光相应的光刻胶时产生曝光量误差。由于曝光强度数据量化计算是按照四舍五入原则进行的,而曝光强度数据是舍还是入难以从理论上来确定。因此,理论上本文只能推算光点非重叠区域可能产生的曝光量的最大误差范围。根据基于四舍五入原则进行量化计算的公式 $D_{ij} = [I_{ij}/I_{pb}]$ 可知,这导致非匀速段每个像素点的每一个曝光强度数据误差为 $[-\frac{1}{2}I_{pb},$

$\frac{1}{2}I_{pb}]$, 相应的曝光量误差为 $[-\frac{1}{2}I_{pb} \cdot \Delta t_{ij},$

$\frac{1}{2}I_{pb} \cdot \Delta t_{ij}]$, 则光点非重叠区域可能产生的曝光量最大误差为 $[-\frac{1}{2}I_{pb} \sum_{j=1}^n \Delta t_{ij}, \frac{1}{2}I_{pb} \sum_{j=1}^n \Delta t_{ij}]$ 。可见,较小的 I_{pb} 有利于减小第二项舍入误差导致的像素点曝光量误差,而加速起始段较大的 $\sum_{j=1}^n \Delta t_{ij}$ 会导致相应区域的曝光量最大误差范围比较大。

3.2.2 直写效率的提高

各速度段进行激光直写的方法充分利用了扫描工作台的加速段和减速段进行直写曝光来提高直写效率,从而降低制作元件的成本。假设扫描直写的行数为 N , 其余各参数含义同第 3.1 小节,则采用此方法节约的直写时间为:

$$t_{save} = \frac{x_{sum}}{v_{con}} \times n = \frac{2(v_{con}^2/2a - x_0)}{v_{con}} \times N = (v_{con} - \frac{2x_0}{a}) \times N. \quad (8)$$

可见,扫描直写的行数越多,扫描工作台的加速度和减速度越小,匀速直写速度越大,非曝光区长度越小,节省的时间就越多。而且,当直写系统

的声光调制器分辨力比较高时,非曝光区长度为零,此时,在扫描工作台的整个加速段和减速段都可以直写,节省的时间相对更多。关于使非曝光区长度为零所需的声光调制器的最小位数已在 3.1 节中进行了讨论。

3.2.3 曝光强度数据调制方法的计算量分析

根据 3.1 节中介绍的各速度段进行激光直写方法,涉及曝光数据调制的是位于扫描工作台加速段和减速段的待曝光像素点。假定直写系统工作台的工作稳定性比较好,且待加工元件为长方形。当扫描工作台单向激光直写时,如图 1(a)所示,只需要调制计算任一扫描行上位于加速段和减速段的所有像素点对应的直写光点的曝光数据。由于本文讨论的直写对象是二元图像,即,曝光区域内直写光点的曝光数据是相同的,所以其它扫描行与该行具有相同横坐标的像素点对应的直写光点的曝光数据完全相同。

当扫描工作台双向激光直写时,如图 1(b)所示,由于正向直写的加速段和减速段分别对应反向直写的减速段和加速段,具有相同横坐标的像素点的曝光起始速度不同,导致调制计算方法不同,所以需要分别调制计算正向直写和反向直写时整个扫描行上位于加速段和减速段的所有像素点对应的直写光点的曝光数据。也就是说,双向激光直写时需要调制计算相邻两个扫描行上的曝光数据,其它扫描行与该行具有相同直写方向和横坐标的像素点对应的直写光点的曝光数据完全相同。通过以上分析大幅度减少了曝光强度数据调制方法的计算量。

4 仿真分析

为了验证所提出的各速度段进行激光直写方法的有效性,本节根据 3 节所提方法进行了仿真分析。设定曝光直写系统的相关参数如下:扫描工作台的位置传感器分辨力为 $S_{pp} = 20 \text{ nm}$,加速段和减速段的加速度为 $a = 50 \text{ mm/s}^2$,匀速曝光直写的速度为 $v_{con} = 10 \text{ mm/s}$;用来曝光直写的激光点为强度均匀的方形平顶激光束,尺寸为 $1 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$,被曝光图案的大小为 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$,被曝光的光刻胶为 Microposit S1805 正性光刻胶,曝光阈值为 $E_0 = 82 \text{ mJ/cm}^2$,声光调制器的

D/A 转换器位数为 16,被声光调制器调制前激光输出的最大光强为 $I_{max} = 1.64 \times 10^7 \text{ mW/cm}^2$,扫描工作台匀速曝光直写时需要的激光光点光强为 $I_{cv} = 8.2 \times 10^6 \text{ mW/cm}^2$,曝光时间脉冲宽度为 $10 \mu\text{s}$ 。

根据上述参数,可仿真计算得到此时非曝光区长度 $x_0 = 0$,扫描工作台全程运动中都可进行曝光直写,其加速段和减速段的有效曝光长度均为 1 mm ,各包含 1 000 个像素点;扫描工作台以匀速 v_{con} 运动对像素点进行 $10 \mu\text{s}$ 曝光时,直写光点在扫描方向上的畸变长度对应的位移分辨力个数为 5。假设扫描工作台进行双向直写,由于本文所提直写方法与传统直写方法中行间定位平台移动定位时间相同,这里不予考虑。根据上述参数可计算得到用本文所提方法直写完待加工元件花费的时间是 3 500 s,是传统只在匀速段直写时间的 77.77%,节约了 1 000 s。

由于扫描工作台加速段和减速段有一定的对称性,同时数据量又比较大,因此本文仅提供了扫描工作台加速段前 5 个像素点所获得的曝光量的三维分布,如图 7 所示。可以看出,这 5 个像素点所获得的曝光量基本都在 82 mJ/cm^2 附近。为了精确分析光刻胶各处的曝光量分布情况,仿真分析了加速段的曝光量误差,如图 8 所示,这里假定加速段各个像素点都需要曝光。由于本例中单个激光点在扫描工作台匀速运动情况下直写的畸变长度恰好为扫描工作台位移分辨力的整数倍,所以直写光点畸变长度量化误差产生的曝光区域误差和曝光量误差都为零。图 8 中误差仅是像素点曝光强度量化误差导致的曝光量误差。由于像素点间非重叠区的曝光量误差处处相同,所以此段区域只选取了其中一个误差数据进行绘图,且采样点间距为扫描工作台的位置传感器分辨力 20 nm 。由图 8 可知,相对于传统匀速直写,扫描

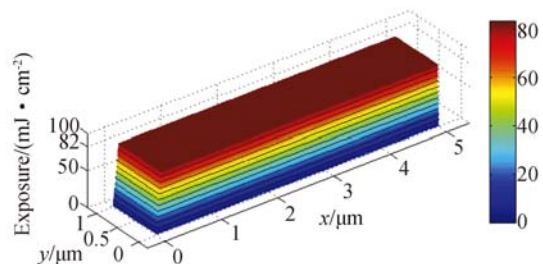


图 7 曝光量的三维分布
Fig. 7 3D distribution of exposure

工作台整个加速段进行直写曝光产生的曝光量误差不大于前者曝光量的0.4%,而且较大的误差出现在扫描工作台加速段的起始曝光处,这与前面的理论分析是一致的。

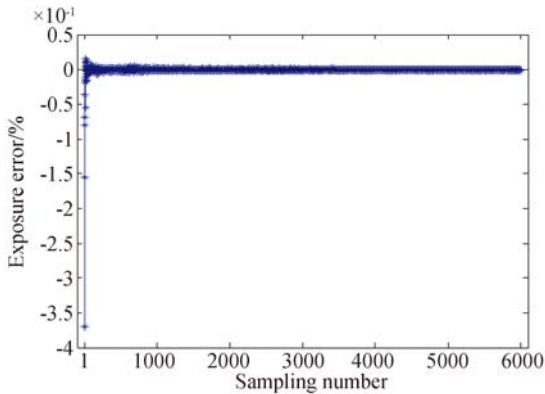


图8 16位声光调制器时加速段的曝光量误差

Fig. 8 Exposure error in accelerating section of moving stage with 16 bits acoustooptic modulator

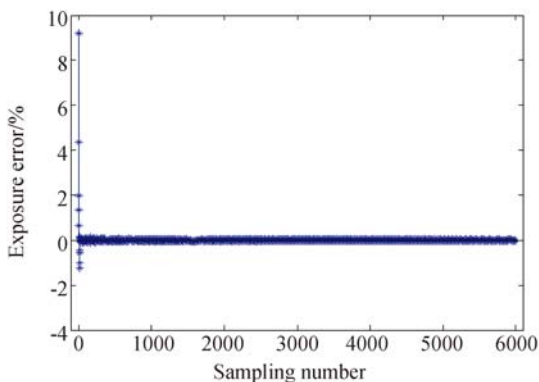


图9 12位声光调制器时加速段的曝光量误差

Fig. 9 Exposure error in accelerating section of moving stage with 12 bits acoustooptic modulator

本文也对声光调制器分辨力对曝光量误差的影响进行了仿真分析,将声光调制器的D/A转换器位数改为12,其余参数保持不变,计算得到加速段的曝光量误差曲线如图9所示。可见,相对于传统匀速直写,扫描工作台整个加速段进行直写曝光产生的曝光量误差约是前者曝光量的10%,较大的误差仍然出现在扫描工作台加速段的起始曝光处,但整体误差较16位的声光调制器明显增大,这与前面的理论分析是一致的,即较高的声光调制器分辨力有利于减小曝光量误差。

通过前述仿真分析可见,本文所提扫描工作

台各速度段进行激光直写二元图案的方法,在声光调制器分辨力越高时光刻胶上的曝光量分布情况与传统匀速直写时相差越小,而直写效率却得到了显著提高。

5 结论

本文提出了一种扫描工作台各速度段进行激光直写二元图案的方法,该方法用扫描工作台的位置反馈脉冲同步触发激光束曝光光刻胶,实现像素点的理想位置曝光;而且依据扫描工作台的运动特性和匀速直写时各像素点获得的曝光量情况,对处于扫描工作台加、减速度段的像素点的曝光强度进行调制。理论分析表明:各速度段进行激光直写方法所产生的误差主要包括两次量化过程引起的舍入误差,其中以扫描工作台位移分辨力为单位量化直写光点畸变长度产生的舍入误差在系统直写参数允许调整的情况下可以完全消除;而以声光调制器分辨力调制的曝光强度为单位量化各像素点曝光数据产生的舍入误差则无法完全消除,但可以通过提高声光调制器的位数来减小此项误差导致的像素点曝光量误差。各速度段进行激光直写方法所节约的直写时间与扫描直写的行数、扫描工作台的加速度和减速度、匀速直写速度、非曝光区长度有关,而且较高的声光调制器分辨力有利于减小非曝光区长度。另外,由于本文讨论的直写对象是二元图像,曝光区域内直写光点的曝光数据是相同的,所以只需要调制计算某一扫描行或相邻扫描行上的位于加速段和减速段的所有像素点对应的直写光点的曝光强度数据,计算量不大。仿真实验表明:以5 mm×5 mm曝光图案为例,本文所提方法是传统只在匀速段直写时间的77.77%,可节约时间1 000 s。同时配备的声光调制器位数由16降为12时,相对于传统匀速直写,扫描工作台整个加速段直写产生的曝光量相对误差由0.4%上升为10%。可见,声光调制器分辨力越高,本文所提曝光强度调制直写方法使光刻胶上的曝光量分布情况与传统匀速直写时相差越小,直写效率却获得了比较大的提高,从而验证了本文所提扫描工作台各速度段进行激光直写的方法是提高直角坐标激光直写二元图案效率的一种有效方法。

参考文献:

- [1] WANG D SH, LUO CH T, XIONG Y Q, *et al.*. Fabrication technology of the centrosymmetric continuous relief diffractive optical elements[J]. *Physics Procedia*, 2011, 18: 95-99.
- [2] HUANG Y Q, HUANG R, LIU Q L, *et al.*. Realization of III-V semiconductor periodic nanostructures by laser direct writing technique [J]. *Nanoscale Research Letters*, 2017, 12: 12.
- [3] TONG Q C, LUONG M H, TRAN T M, *et al.*. Realization of desired plasmonic structures via a direct laser writing technique[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2017, 46(6): 3695-3701.
- [4] LUO ZH, WANG C, YIN K, *et al.*. Rapid fabrication of cylindrical microlens array by shaped femtosecond laser direct writing[J]. *Applied Physics A*, 2016, 122(7): 633.
- [5] 冯晓国, 张舸, 汤洋. 薄膜型金属网栅的电磁屏蔽特性[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(3): 686-691.
- FENG X G, ZHANG G, TANG Y. Electromagnetic shielding properties of metallic mesh coatings [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(3): 686-691. (in Chinese)
- [6] 刘东旭, 夏虹, 孙允陆, 等. 飞秒激光直写生物凝胶模板原位合成纳米粒子[J]. *中国光学*, 2014, 7(4): 608-615.
- LIU D X, XIA H, SUN Y L, *et al.*. Femtosecond laser direct writing bio-gel template for in situ synthesis of nanoparticles[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(4): 608-615. (in Chinese)
- [7] 蔡志祥, 曾晓雁. 激光微熔覆技术的发展及应用[J]. *中国光学与应用光学*, 2010, 3(5): 405-414.
- CAI ZH X, ZENG X Y. Development and applications of laser micro cladding[J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2010, 3(5): 405-414. (in Chinese)
- [8] 陈林森, 邵洁, 王雪辉, 等. 一种二元整形元件激光直写方法的实验研究[J]. *光子学报*, 2005, 34(3): 346-349.
- CHEN L S, SHAO J, WANG X H, *et al.*. A new laser direct writing method of binary beam-shaping element[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(3): 346-349. (in Chinese)
- [9] YU Y H, TIAN ZH N, JIANG T, *et al.*. Fabrication of large-scale multilevel phase-type Fresnel zone plate arrays by femtosecond laser direct writing[J]. *Optics Communications*, 2016, 362: 69-72.
- [10] GALE M T, ROSSI M, PEDERSEN J, *et al.*. Fabrication of continuous-relief micro-optical elements by direct laser writing in photoresists[J]. *Optical Engineering*, 1994, 33(11): 3556-3566.
- [11] POLESHCHUK A G, CHURIN E G, KORONKEVICH V P, *et al.*. Polar coordinate laser pattern generator for fabrication of diffractive optical elements with arbitrary structure[J]. *Applied Optics*, 1999, 38(8): 1295-1301.
- [12] HARUNA M, YOSHIDA S, TODA H, *et al.*. Laser-beam writing system for optical integrated circuits [J]. *Applied Optics*, 1987, 26(21): 4587-4592.
- [13] BECKER H, CASPARY R, CTOEPFER C, *et al.*. Low-cost direct writing lithography system for the sub-micron range[J]. *Journal of Modern Optics*, 1997, 44(9): 1715-1723.
- [14] 邱传凯, 杜春雷, 侯德胜. 激光直写光刻工艺技术研究[J]. *光电工程*, 1997, 24(S1): 36-40, 45.
- QIU CH K, DU CH L, HOU D SH. Research on the technologies for laser direct writing[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1997, 24(S1): 36-40, 45. (in Chinese)
- [15] RUNG S, REXHEPI M, BISCHOFF C, *et al.*. Laserscribing of thin films using top-hat laser beam profiles[J]. *Journal of Laser Micro/Nano-engineering*, 2013, 8(3): 309-314.

作者简介:



张 山(1979—),男,山东威海人,博士,讲师,主要从事激光直写光刻工艺及超精密驱动定位技术的研究。E-mail: zhangshan212@163.com



王 雷(1976—),男,黑龙江哈尔滨人,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为超精密微位移驱动控制技术、超精密测量控制技术与仪器工程、基于智能材料的纳米位移执行机构等。E-mail: hit_wanglei@hit.edu.cn