

激光与光电子学进展

对基于时空干涉的空间整形的畸变与光强校正

林御寒, 石惠, 贾天卿*

华东师范大学精密光谱科学与技术国家重点实验室, 上海 200241

摘要 时空干涉的飞秒激光空间整形技术是一种新型图形化激光加工方法, 相比传统技术更加简单灵活并有更高的效率。然而此技术中的缩束系统造成的成像畸变严重影响了加工的准确性。本文模拟并分析了该系统中的畸变现象, 利用空间光调制器的相位全息图补偿畸变引起的空间光场的位置变化和光强分布不均。此方法可使曝光处干涉图案的最大偏移量由 $10.66\ \mu\text{m}$ 趋近于 0, 在实验中将相对最大偏差由 60.42% 降至 8% 以下, 并使该处二维光强分布趋近于平顶光。该算法降低了时空干涉的飞秒激光空间整形技术对于缩束成像系统的设计需求, 节省了成本与时间。基于以上方法, 在不锈钢表面拼接加工出了 $1.5\ \text{mm} \times 1.5\ \text{mm}$ 的具备多级别防伪能力的二维码图案。

关键词 激光器; 飞秒激光整形; 时空干涉; 畸变校正; 平顶光整形; 微纳加工

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0314002

Distortion and Light Intensity Correction for Spatiotemporal-Interference-Based Spatial Shaping

Lin Yuhan, Shi Hui, Jia Tianqing*

State Key Laboratory of Precision Spectroscopy, East China Normal University, Shanghai 200241, China

Abstract As a kind of new graphic laser processing method, the femtosecond laser spacing technology, based on the spatiotemporal interference, is more easy, flexible and efficient than traditional ones. However, the imaging distortion introduced by the shrink-beam system has huge influence on the accuracy of processing. This work simulates and analyzes the distortion of the system, and uses the phase hologram of the spatial light modulator to compensate the position change of the spatial light field and uneven light intensity distribution caused by the distortion. The method can make the maximum deviation of the interference pattern near the exposure point approach 0 from $10.66\ \mu\text{m}$, the relative maximum deviation reduces from 60.42% to under 8% and the two-dimension light intensity distribution get close to flat-top. This algorithm reduces the design requirements of the femtosecond laser space shaping technology of space-time interference for the reduced beam imaging system, and saves cost and time. Based on the above methods, a $1.5\ \text{mm} \times 1.5\ \text{mm}$ quick response code pattern with multi-level anti-counterfeiting capability was spliced and processed on the stainless steel surface.

Key words lasers; femtosecond laser shaping; spatiotemporal interference; distortion correction; flat-top light shaping; micro-nano fabrication

OCIS codes 140.3300; 140.3390; 140.3538

收稿日期: 2020-05-25; 修回日期: 2020-06-17; 录用日期: 2020-06-24

基金项目: 国家自然科学基金(11474097)、上海市科学技术委员会(19ZR1414500)、强场激光物理国家重点实验室开放基金(中国科学院上海光学精密机械研究所)(19CK010301)

*E-mail: tqjia@phy.ecnu.edu.cn

1 引言

飞秒激光有超高的峰值能量密度和超短的脉冲宽度,热效应低,能够诱导出微米或纳米尺度的表面结构^[1]。运用这项技术,可以改变几乎任何种类材料表面的光学、化学、浸润、摩擦学等多类性能^[2]。人们已经运用表面微结构实现了许多独特的功能,广泛应用于表面着色^[3-4]、修改材料润湿性^[5-6]、电磁波调制^[7]、减少湍流摩擦损失^[8]、改变表面摩擦系数^[9]、光学信息存储^[10]等领域中。表面结构的几何形貌与表面的物理性质密切相关,人们能够通过控制激光脉冲的空间强度分布来决定结构形貌的几何形态,从而使表面具备期望的物理性质。

基于时空干涉的飞秒激光无掩模柔性表面整形^[11]是一种控制光强分布模式的新方法,这是一种基于迈克耳孙干涉仪的实验装置,可通过空间光调制器(SLM)控制两束光的相位差分布,将出射光调制成任意形状的干涉分布。此种方法相较于衍射光学元件^[12]等静态空间整形器件更加灵活,相比基于数字微反射镜(DMD)的无掩模激光加工技术^[13-15]能够在不降低分辨率的前提下控制强度分布,而相比于同样基于SLM的计算全息图(CGH)衍射投影技术^[16-21],不需要长时间的复杂迭代计算,具有更高的效率。

此方法需要利用缩束成像系统将干涉分布模式按一定比例缩小投影以加工微纳结构,但由于实际系统在实现极高精度的成像上存在一定难度,且目前尚无适用于本加工技术的工业级成像物镜,实际使用中系统在成像时会不可避免地引发畸变。畸变是由于焦平面上不同区域对影像的放大率不同而形成的画面扭曲变形现象,它不会影响系统成像的清晰度,但会让像平面上的点到中心的位置发生变化,进而影响最终加工图案的质量。畸变的补偿校正已被运用于基于DMD的光束整形^[22]、立体光刻系统^[23]等领域,能够有效提高激光加工的精度。然而基于我们的认识,目前对基于时空干涉的空间整形系统的畸变补偿研究仍是一片空白。

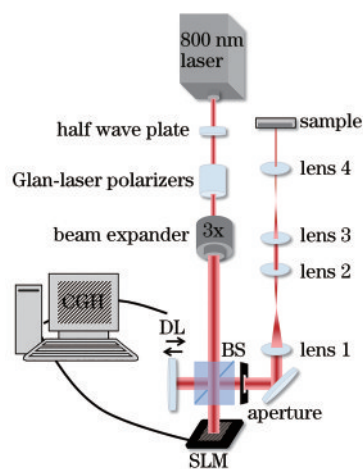
本文对这种双光束干涉的空间整形的光强分布进行了模拟与分析,首次提出了适用于该项技术的畸变校正方法。通过直接修改SLM上相位差的几何形状分布,反向补偿了由于固定畸变导致的干涉强度位置变化;再对相位差的梯度进行了微调以保持曝光处的空间光强分布在较大输出功率下并表现为近平顶光模式。此校正方法可用于在均匀

光强下精细拼接加工复杂的大面积表面微结构。作为应用实例,我们成功地在不锈钢表面加工了含复杂微纳结构的二维码图案,该图案具有色彩、结构、高信息量的多级别防伪能力。

2 实验方法与结果

2.1 实验装置

如图1所示,搭建一台基于双光束干涉的激光加工系统,可用于产生任意二维空间光强分布。图中,透镜1~4的焦距分别为500 mm,100 mm,600 mm,50 mm。系统中使用了再生放大飞秒Ti:蓝宝石激光器,中央波长为800 nm,脉冲持续时间为50 fs,单脉冲能量最高可达2.5 mJ,重复频率为1 kHz;相位差分布由空间光调制器(分辨率为1920 pixel×1080 pixel,像素间距为8 μm,大小为15.36 mm×8.64 mm)。通过转动1/2波片,精确调制经格兰棱镜后固定偏振方向的激光光强,避免使用连续衰减片时导致的光强不均。激光被分束镜分为两束光,其中一束光被SLM的液晶板反射,另一束光被安装在一维平移台上的平面镜反射,该平移台精度为50 nm,行程为500 μm,可使平面镜线性移动,以控制两相干光束间的光程差。缩束系统由4个凸透镜搭建而成,在光路中相邻透镜两两组成4f系统,可在加工处焦平面保留原始光场的完整相位信息。样品被固定于三维平移台上,该平移台的三轴参数相同,精度为0.01 mm,行程为15 mm,用于精确控制激光与样品作用的位置。加工时,将一白光光源放置于样品侧面,使用CCD在另一侧接收样品反射光,以进行旁轴观测。



DL: delay line; BS: beam splitter

图1 基于时空干涉的飞秒激光整形实验装置

Fig. 1 Experimental setup of spatiotemporal-interference-based femtosecond laser shaping

2.2 畸变校正的算法与模拟

缩束前,干涉强度是由两束光之间的相位差决定,

$$|I_s| = 2I_0 \left| \cos \frac{\Delta\theta}{2} \right|. \quad (1)$$

设实验时平面镜相比 SLM 表面到分光镜的距离小 $1/4\lambda$ ($\approx 200 \text{ nm}$), 则光程差为 $1/2\lambda$ ($\approx 400 \text{ nm}$); 该情况下, 根据(1)式可得构成所需图案的相位全息图的像素产生的相位差为 π , 干涉图案上对应像素的强度为 $2I_0$, 而其他像素产生的相位差为 0, 对应位置的强度为 0. 实验装置中的 SLM 的单个像素相位调节范围为 $0 \sim 2\pi$, 与计算机加载的相位全息图中 $0 \sim 255$ 灰度值呈线性对应关系, 由此可通过目标光强分布逆推出全息图中像素点的灰度分布模式。

使用 Zemax 软件对缩束成像系统进行模拟, 如图 2 所示。模拟时使用了格子状分布的相位全息图, 如

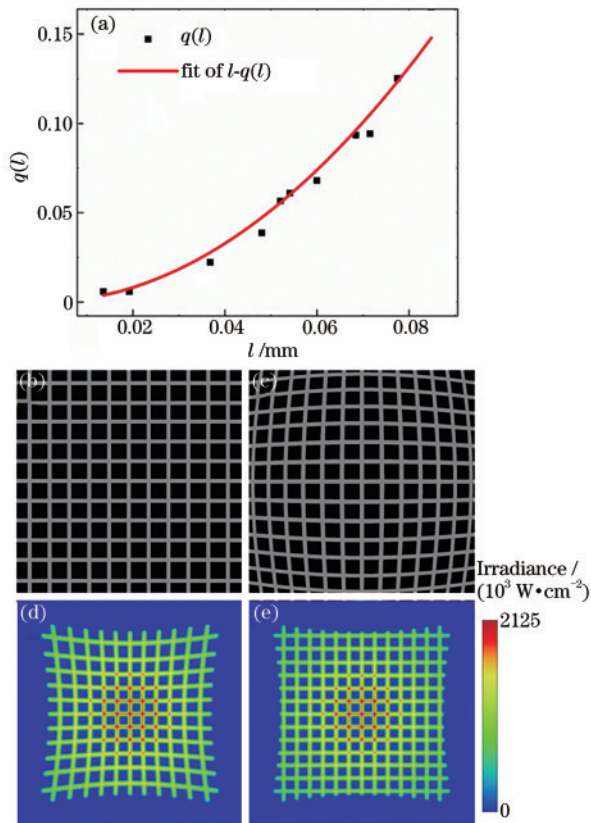


图 2 模拟结果。(a) $l-q(l)$ 相对畸变拟合曲线; (b)(c) 畸变校正前后的网格状相位全息图; (d)(e) 在 SLM 上加载 (b) 和 (c) 图时模拟得到的样品处的光强分布

Fig. 2 Simulation results. (a) Relative distortion fitting curve of $l-q(l)$; (b)(c) gridded phase holograms before and after distortion correction, respectively; (d)(e) distribution of irradiance at the simulated sample when Figs. (b) and (c) are loaded on SLM

图 2(b) 所示。原始格子图对应的像素: 每一正方形边长为 65 pixel, 灰度值为 0, 每一条线段宽度为 25 pixel, 对应灰度值为 127, 图像分辨率为 $1080 \text{ pixel} \times 1080 \text{ pixel}$, 对应 SLM 上 $8.64 \text{ mm} \times 8.64 \text{ mm}$ 的液晶阵列, 可知方块边长实际值为 0.52 mm 。总功率为 $1.051 \times 10^{-1} \text{ W}$ 时模拟的缩束后像面的空间光强分布如图 2(d) 所示, 具有明显的枕形畸变; 在枕形畸变中, 图像的放大倍率随着视场的增加而增大, 表现为像的四周向外拉伸, 而越接近中心畸变程度越低。

在固定光路中, 畸变的效果同样也是固定的, 因此可对缩束前的原始图像进行处理, 在缩束后得到所期望的光强分布。

将相对畸变描述为

$$q(l) = \frac{l' - l}{l} \times 100\%, \quad (2)$$

式中: 目标点到成像最中心距离为 l , 其对应的实际点到最中心的距离为 l' 。可将 $q(l)$ 用 l 的 n 次项函数表示, 由于缩束系统在整个光路中呈中心对称, 可以舍去奇次项, 即

$$q(l) = al^2 + bl^4 + cl^6 + dl^8 + \dots \quad (3)$$

在拟合时增加多项式阶数虽一定程度上能使结果更加精确, 但却会极大增加运算量, 且更容易被含误差的数据所影响。在经过尝试后, 选择使用二次函数进行拟合, 其运算量小, 依然能极好地满足校正的要求。因此可把 $q(l)$ 写为

$$q(l) = al^2. \quad (4)$$

由原始图像的数据可计算出缩束 60 倍后的理想光强分布中相消的方形边长为 $8.67 \mu\text{m}$, 相长的单线宽度为 $3.33 \mu\text{m}$ 。可以推算出目标分布中任一方形顶点到成像最中心距离 l , 将其与实际距离 l' 进行拟合, 得到拟合结果系数 $a = 20.479, R^2 = 0.973$ 。

假设校正后的实际点到最中心距离为 L' , 如果校正成功则其与 l 是等价的。令 L' 所对应的目标点到最中心距离为 L , 则有

$$q(L) = aL^2 = \frac{L' - L}{L} \times 100\%. \quad (5)$$

将该方程变换为用已知量 L' 表达 L 的函数, 除去含虚数的无意义解, 留下实数解。

$$L = \frac{\left(\frac{2}{3}\right)^{1/3}}{\left(-9a^2L' + \sqrt{3}\sqrt{4a^3 + 27a^4L'^2}\right)^{1/3} - \left(-9a^2L' + \sqrt{3}\sqrt{4a^3 + 27a^4L'^2}\right)^{1/3}} \cdot 2^{1/3} \times 3^{2/3} a. \quad (6)$$

将 L 乘以缩束倍数后,即可得出校正后实际点对应的 SLM 的相位图上的位置到中心的距离。由于经过两次成像,像的方向和 SLM 上全息图的方向一致,即中心轴到成像前后两点的方向完全相同,故可在液晶板所在平面上推出校正后点对应的正确位置。

图 2(c) 为代入 a 值后,计算得到的相位结果;图 2(e) 展示了使用 Zemax 软件在总功率为 $1.079 \times 10^{-1} \text{ W}$ 时模拟的校正后曝光点实际的光场分布,其形状分布与期望的分布完全相符;图 2(d) 中光场最边缘处距中心的距离为 $97.86 \mu\text{m}$,该点所对应的图 2(e) 中的距中心距离为 $87.20 \mu\text{m}$,修正了向外偏移 $10.66 \mu\text{m}$ 的误差,成功还原了所期望的曝光点处的目标光强分布。

2.3 光强校正的算法与模拟

畸变不仅会造成成像形状的改变,也会引起光强分布的改变。在枕形畸变中视场越大,放大率越高,也就意味着光束越远离中心,其光强越分散;这表现为均匀强度分布的光在经枕形畸变的成像系统后,光强分布从中心到外侧是逐渐减小的。光强分布的不均匀极容易导致加工结构出现不规则的缺陷。因此,需要对光强分布进行均一化,使曝光点接近平顶光。

在 SLM 上加载图 4(a) 的相位图,直径为 750 pixel 的圆内外相位差为 π ,其对应的液晶板上实际直径为 6 mm。经模拟所得曝光点处的光功率分布如图 4(b) 所示。因光场满足中心对称,可使用中心位置与光场中心重合的高斯函数对水平方向上的光强分布进行拟合。

$$I = I_0 + A \exp\left(-\frac{x^2}{2w^2}\right), \quad (7)$$

式中: x 为曝光点上任一点到中心的距离,单位为 μm ; I 取作 $I_{\text{origin}}/I_{\text{max}}$, 即是令 I_{max} 为单位 1 后替换得到的相对光强; A 为拟合函数的幅值。拟合结果如图 3 所示,其对应的 $R^2=1-3.5 \times 10^{-4}$ 。

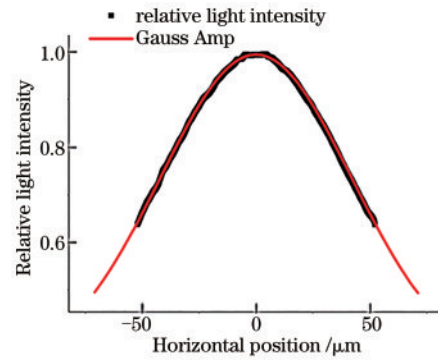


图 3 对圆形光场缩束后的相对光强分布 Gauss Amp 拟合曲线
Fig. 3 Gauss Amp fitting curve for relative light intensity distribution of circular light field after the contraction

表 1 对圆形光场缩束后的相对光强分布 Gauss Amp 拟合所得解与其标准差

Table 1 Gauss Amp fitting solution and its standard deviation for relative light intensity distribution of circular light field after the contraction

Item	Value	Standard deviation
I_0	0.336	1.66×10^{-3}
w	42.109	9.17×10^{-2}
A	0.658	1.57×10^{-3}

当 x 取最大值时,即对应曝光处光场的边界 $x_{\text{max}}=2.3 \mu\text{m}$ 。根据拟合结果由(7)式得到该位置光强为 $1.418 \times 10^3 \text{ W/cm}^2$,即光强校正的目标光强大小,所对应相对光强 $I_{\text{min}}=0.667$ 。对曝光点上任意一点,令其均一化后所对应像素点的相位差为 φ ,有

$$\frac{I_{\text{min}}}{I} = \frac{\sin \frac{\varphi}{2}}{\sin \frac{\pi}{2}}. \quad (8)$$

则该像素点的灰度值为

$$g_{\text{gray}} = \frac{255}{\pi} \arcsin \frac{I_{\text{min}}}{I}. \quad (9)$$

根据(6)式可推得像素所在位置,

$$X = k \left[\frac{\left(\frac{2}{3}\right)^{1/3}}{\left(-9a^2x + \sqrt{3} \sqrt{4a^3 + 27a^4x^2}\right)^{1/3}} - \frac{\left(-9a^2x + \sqrt{3} \sqrt{4a^3 + 27a^4x^2}\right)^{1/3}}{2^{1/3} \times 3^{2/3} a} \right], \quad (10)$$

式中: k 为缩束系统的倍数 60。由此可得,均一化后 SLM 上任意位置的相位分布,如图 4(d) 所示;均一化后的光强分布如图 4(e) 所示,平均值为 $1.428 \times 10^3 \text{ W/cm}^2$,标准差为 19.05。其相比于均一化前,

曝光点总光照强度仅减小了 16.49%,波动幅度却由 $1.413 \times 10^3 \text{ W/cm}^2$ 变为 46 W/cm^2 ,标准差减小了 240.06,光强的均匀性得到了大幅提升。此外,在实际实验中,并不是每次都需用到液晶板的纵向

所有像素,因此可通过目标结构的大小确定其外切圆的半径作为 x_{\max} 的取值,以使均一化的目标光强取最大,将光强校正导致的功率损失降为最低。

基于以上,可将光强校正算法和畸变校正相结合,在避免功率大幅损失的前提下完全消除由于成像系统导致的曝光点光强分布不均和成像扭曲。

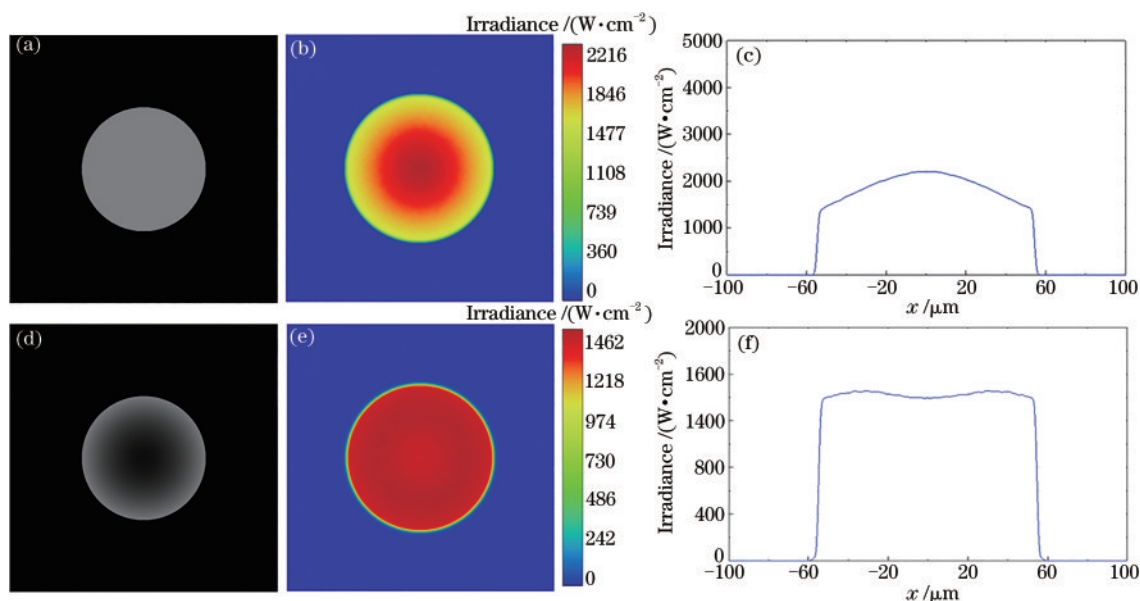


图 4 模拟结果。(a)(d)光强校正前后的圆形相位全息图;(b)(c)在SLM上加载(a)图时的二维和一维的模拟光强分布,总功率为 $1.619 \times 10^{-1} \text{ W}$; (e)(f)在SLM上加载(d)图时的二维和一维的模拟光强分布,总功率为 $1.352 \times 10^{-1} \text{ W}$

Fig. 4 Simulation results. (a)(d) Circular phase holograms before and after light-intensity correction; (b)(c) two-dimensional and one-dimensional simulated light intensity distributions when loading Fig. (a) on SLM, total power is $1.619 \times 10^{-1} \text{ W}$; (e)(f) two-dimensional and one-dimensional simulated light intensity distributions when loading Fig. (d) on SLM, total power is $1.352 \times 10^{-1} \text{ W}$

2.4 畸变与光强校正的验证

为验证畸变与光强校正的效果,采用校正前和校正后的相位全息图加载于SLM上,分别对样品表面进行激光加工。加工的目标图案为七条宽为 $7 \mu\text{m}$ 的等长线段,线段的间距为 $5.5 \mu\text{m}$;由此可得,在 $1080 \text{ pixel} \times 1080 \text{ pixel}$ 的校正前相位全息图中线段宽度为 52 pixel,间距为 41 pixel,如图 5(a)所示,对该全息图进行畸变与光强校正处理后,其结果如图 5(e)所示。在模拟时两种图采用了完全相同的激光光源,其结果显示,校正后的峰值光强 $1.554 \times 10^3 \text{ W/cm}^2$ 为校正前 $2.318 \times 10^3 \text{ W/cm}^2$ 的 67%,因此在实验中,为便于对照,需通过旋转 $1/2$ 波片以控制两次曝光的峰值光强相等。

利用缩束系统分别重建了原始的和校正后的干涉分布,在 0.5 mm 厚的不锈钢表面上,各单次曝光通过 30 个脉冲;激光单脉冲能量分别为校正前 $70 \mu\text{J}$,校正后 $104.48 \mu\text{J}$,重复频率均为 1 kHz 。

如图 5(e)所示,校正前的加工图案分布有明显的畸变,表现在条纹明显弯曲,且四周相比中心线段的宽度更大,经测量,中间线段的最中心宽度为

$7.18 \mu\text{m}$,而同一线段的边缘处宽度为 $11.23 \mu\text{m}$,其分别对应了该区域内线宽的最小值与最大值, $\Delta x = 0.18 \sim 4.23 \mu\text{m}$,相对偏差为 $2.57\% \sim 60.42\%$ 。而校正后加工图案如图 5(h)所示,线段接近平行和等距分布,测量所有线段的线宽,所得值在 $6.63 \sim 7.55 \mu\text{m}$ 范围内, $\Delta x = -0.17 \sim 0.55 \mu\text{m}$,相对偏差为 $-5.28\% \sim 7.86\%$ 。缩束系统畸变引起的空间光强分布偏差在使用校正技术后得到了明显改善。

放大观察校正前的加工图案(图 6),在边缘处,图案相对模拟结果有明显的缺失,线段不连续,并偶有断裂,这是由于枕形畸变导致的曝光点处光强不均,越偏离曝光中心,光强越小,材料表面烧蚀效果越差。而经算法调制后,光强偏差也得到了有效改进,在双光束的相长区域实现了近平顶光分布,在曝光点任意位置都能够对材料造成相同的烧蚀效果,加工图案的细节也得以完整保留。

2.5 拼接加工大面积微结构

通过对枕形畸变的校正,成像面的边缘区域加工精度有了大幅提升,当进行多个微结构拼接加工时,图案间的衔接处能够完好地接合,得到完整还

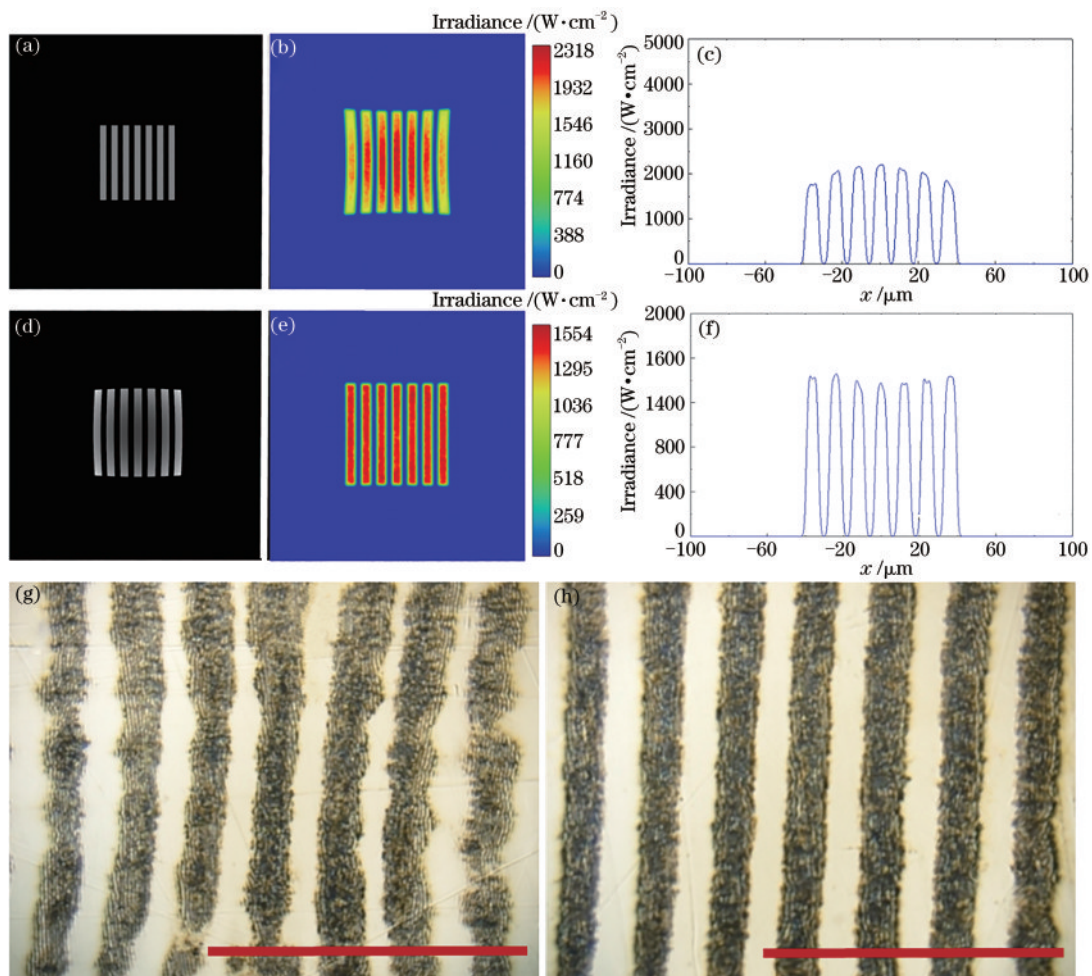


图 5 模拟结果。(a)(d)畸变与光强校正前后的条状相位全息图;(b)(c)在 SLM 上加载(a)图后的二维和一维的模拟光强分布,总功率为 $6.995 \times 10^{-2} \text{ W}$; (e)(f)在 SLM 上加载(d)图后的二维和一维的模拟光强分布,总功率为 $5.073 \times 10^{-2} \text{ W}$; (g)(h)加载(a)或(d)图时,不锈钢表面加工的图形

Fig. 5 Simulation result. (a)(d) Striped phase holograms before and after distortion and light-intensity correction; (b)(c) two-dimensional and one-dimensional simulated light intensity distributions when loading Fig. (a) on SLM, total power is $6.995 \times 10^{-2} \text{ W}$; (e)(f) two-dimensional and one-dimensional simulated light intensity distributions when loading Fig. (d) on SLM, total power is $5.073 \times 10^{-2} \text{ W}$; (g)(h) stainless steel surface processing images, when loading Fig. (a) or (d)

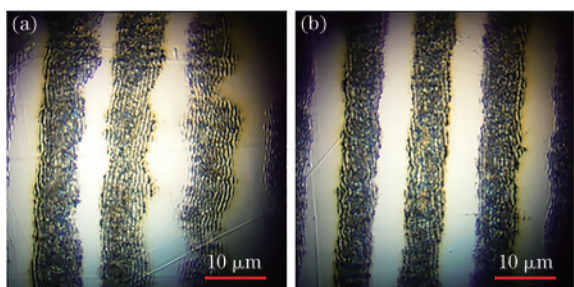


图 6 校正前后激光加工图案边缘图像。(a)校正前;(b)校正后
Fig. 6 Edge images of laser processing results before and after correction. (a)Before correction; (b)after correction

原的大面积的复杂加工结构。图 7 展示了将单个条纹结构通过横向拼接得到的超长图案。将校正后的相位全息图加载于 SLM 上,单次通过 30 个脉冲,

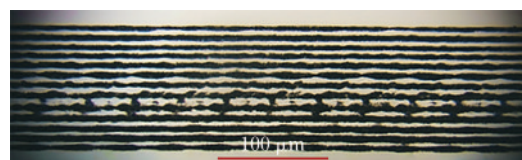


图 7 在 500 μm 厚硅片上通过拼接加工而成的长条纹结构
Fig. 7 Long stripe structure on a 500 μm thick silicon formed by stitching

单脉冲能量为 40 μJ ;每次曝光后精确控制样品台横向移动 40 μm ,利用计算机实现自动的高效快速并行加工。由于装配反射镜的电动平移台有微小的机械抖动,干涉中心的相长区域有小幅扰动,致使光强分布的中心处不够稳定,如果更换精度更高的平移台应可解决该问题。

激光标识作为一种新型的防伪技术^[24],具有仿制难度高、易辨认等特点;为验证本文中校正方法的有效性和实用性,将该方法运用于二维码防伪结构的制作。本次加工的二维码为常见的 QR Code (Quick Response Code),其信息容量大,支持快速识读,保密性强,本身就是一种优秀的防伪结构。设备在识别二维码时,会对图像进行二值化处理,

识别出在二进制中代表“1”的深色像素和代表“0”的浅色像素。

加工使用的相位全息图如图 8(a)、(b)所示,为了对原始相位图进行畸变与光强校正,欲将二维码的深色像素加工为纵向或横向的密集条纹型结构,单个长条的预期长度和宽度各为 71.43 μm 和 8 μm,预设 7 个微结构拼接的总长度为 500 μm。

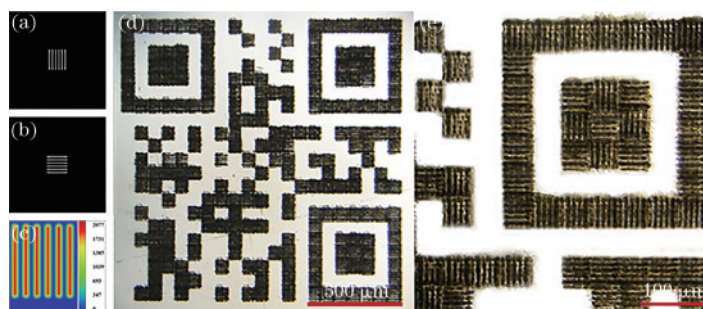


图 8 模拟结果。(a)(b)加工二维码单个像素时的两种相位全息图;(c)在 SLM 上加载(a)图后的二维模拟光强分布,峰值光强为 $2.077 \times 10^3 \text{ W/cm}^2$; (d)不锈钢表面二维码结构全貌;(e)二维码结构放大观测图

Fig. 8 Simulation results. (a) (b) Two phase holograms when processing a single pixel of a QR code; (c) two-dimensional simulated light intensity distributions when loading Fig. (a) on SLM, peak irradiance is $2.077 \times 10^3 \text{ W/cm}^2$; (d) QR code structure on stainless steel surface; (e) zoom in the view of the QR code structure

每次曝光前由计算机设定两相位全息图中的其一加载于 SLM 上,单次通过 30 个脉冲加工不锈钢表面;单脉冲能量为 30 μJ,重复频率为 1 kHz;曝光一次后自动控制搭载样品的平移台在水平或竖直方向上按目标图案移动二维码像素边长的倍数。最终在 6 min 之内,迅速加工出了 1.5 mm × 1.5 mm 的二维码结构,通过智能手机或任意设备扫描,能够轻松提取出“ECNU”的文字信息。

条纹较直且分布均匀,经测量,条纹周期 $d=662 \text{ nm}$,这证明了光强分布在校正后具有良好的均匀性。

为检验该系统自动并行加工时光强分布的稳定性,对该二维码图案的结构色进行观测(图 10)。将白光沿不锈钢表面法线方向射入,采用 CCD 在与表面周期性条纹结构垂直的方向上接收样品表面的反射光。令观测方向与表面法线的夹角为 α ,则有

$$d \sin \alpha = m\lambda, \quad (11)$$

式中: d 为光栅周期,即 LIPSS 的条纹周期; m 为衍射级数。

在观测时,不断调整 CCD 的位置,使观测角 α

在曝光时,对光强进行了校正并精确控制了脉冲能量,成功地在加工区域诱导出了符合目标分布的周期性条纹结构。放大后对激光诱导周期性表面微结构(LIPSS)进行观测(图 9),在单个曝光点上,周期

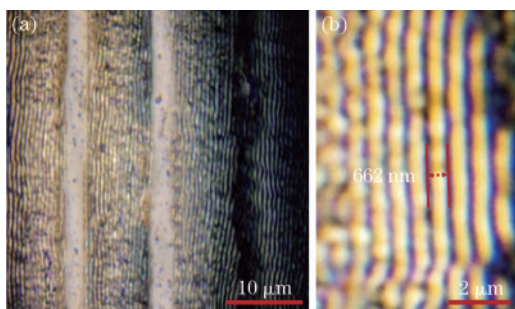


图 9 观测结果。(a)二维码结构内的 LIPSS 图像;(b)测量 LIPSS 条纹周期图例

Fig. 9 Observation results. (a) LIPSS image inside QR code structure; (b) legend for measuring the LIPSS cycle

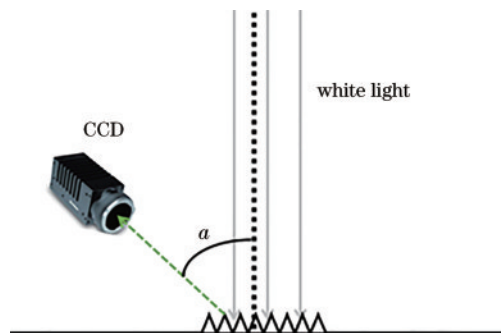


图 10 对二维码结构色的观测方法图例

Fig. 10 Schematic of observation method for the QR code structural color

逐渐减小最终变为 0° , 从图 11 可以看到, 图案的色彩按照橙、黄、绿、蓝、靛的顺序逐渐变化, 衍射峰逐渐蓝移。整个图案在同一角度下观测时颜色和亮度表现基本一致, 证实了这种光强校正方法在实际的激光加工运用中具有对光强的精确控制能力和良好的稳定性。

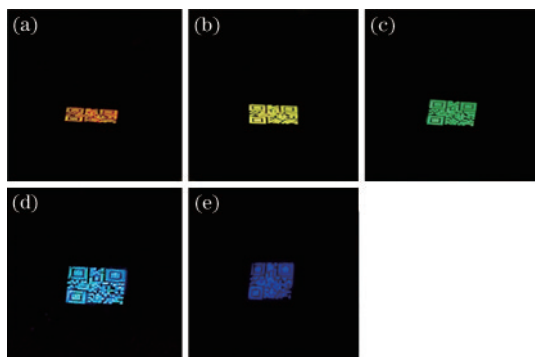


图 11 观测角 α 从大到小逐渐变化观察到的不锈钢表面结构成像图

Fig. 11 Images obtained from the structure on the stainless steel surface of different α varied from large to small

在加工二维码时, 甚至能控制相位全息图的灰度值来人为地导致部分深色像素区域的烧蚀程度过强或过弱, 以控制周期条纹的烧蚀深度和清晰度; 同时可加载更多种形状的相位全息图, 将原有的二进制信息成倍提升, 相比原始二维码能实现更高层级的加密; 此外, 也可控制偏振方向以调节条纹的方向, 增加伪造的难度。因此, 本文中的畸变和光强校正技术可灵活运用于激光防伪标识上, 建立起以下层级的伪造防护效果: 视觉效果(不同角度下的色彩变化)、结构(单个像素内部的形状分布以及烧蚀程度)、加密(单个像素形状分布的额外隐藏信息)。

3 结 论

本文研究了适用于时空干涉的空间整形的畸变校正和光强校正的方法。该方法能够在完全不改变光路的前提下, 仅通过改变 SLM 上加载的相位图分布, 大幅提升了曝光处光场位置的精确性和光强的均匀性。使用本文方法后, 拼接制备微结构时的两图案衔接处的不齐整得到了有效优化, 可应用于多级防伪图形等表面大面积复杂结构的制作。本研究有助于将这种基于迈克耳孙干涉仪和 SLM 的新型空间整形方式运用于高效率高精度的激光并行微纳加工中。

参 考 文 献

- [1] Mourou G, Barry C P J, Perry M D. Ultrahigh-intensity lasers: physics of the extreme on a tabletop [J]. *Physics Today*, 1998, 51(1): 22-28.
- [2] Vorobyev A Y, Guo C L. Direct femtosecond laser surface nano/microstructuring and its applications [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2013, 7(3): 385-407.
- [3] Liu H, Lin W, Hong M. Surface coloring by laser irradiation of solid substrates [J]. *APL Photonics*, 2019, 4(5):051101.
- [4] Feng C P, Cheng K, Cao K Q, et al. Laser induced periodic nanostructure pattern and coloring on free-form surface [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(11): 111423.
冯朝鹏, 程可, 曹凯强, 等. 激光诱导自由曲面周期性纳米结构图案与着色 [J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(11): 111423.
- [5] Ye Y X, Liu Y F, Du T T, et al. Experimental study on gradient wetttable surface fabricated by laser rapid processing [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(10): 1002001.
叶云霞, 刘远方, 杜婷婷, 等. 激光快速加工梯度润湿性表面的实验研究 [J]. *中国激光*, 2019, 46(10): 1002001.
- [6] Fang Y, Yong J L, Huo J L, et al. Bioinspired slippery surface fabricated by femtosecond laser and its applications [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(11): 111413.
方瑶, 雍佳乐, 霍静岚, 等. 飞秒激光仿生制备超滑表面及其应用 [J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(11): 111413.
- [7] Lin D M, Fan P Y, Hasman E, et al. Dielectric gradient metasurface optical elements [J]. *Science*, 2014, 345(6194): 298-302.
- [8] White C, Godfrey Mungal M. Mechanics and prediction of turbulent drag reduction with polymer additives [J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2008, 40(1): 235-256. [LinkOut]
- [9] Zhang X J, Shen J J, Wang J C. Effect of picosecond laser surface texturing on the friction properties [J]. *Applied Laser*, 2018, 38(6): 981-986.
张瑄珺, 沈佳骏, 王健超. 皮秒激光制备表面微结构对摩擦性能的影响 [J]. *应用激光*, 2018, 38(6): 981-986.
- [10] Cerkauskaite A, Drevinskas R, Solodar A, et al.

- Form-birefringence in ITO thin films engineered by ultrafast laser nanostructuring [J]. *ACS Photonics*, 2017, 4(11): 2944-2951.
- [11] Li B H, Jiang L, Li X W, et al. Flexible gray-scale surface patterning through spatiotemporal-interference-based femtosecond laser shaping [J]. *Advanced Optical Materials*, 2018, 6 (24) : 1801021.
- [12] Kuchmizhak A A, Porfirev A P, Syubaev S A, et al. Multi-beam pulsed-laser patterning of plasmonic films using broadband diffractive optical elements [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(14): 2838-2841.
- [13] Hornbeck L J. Projection displays and MEMS: timely convergence for a bright future [J]. *Proceedings of SPIE*, 1995, 2639: 2.
- [14] Wang W, Liu Y Q, Liu Y, et al. Direct laser writing of superhydrophobic PDMS elastomers for controllable manipulation via Marangoni effect [J]. *Advanced Functional Materials*, 2017, 27 (44) : 1702946.
- [15] Cai M, Tu C, Zhang H, et al. Subwavelength multiple focal spots produced by tight focusing the patterned vector optical fields [J]. *Optics Express*, 2013, 21(25): 31469-31482.
- [16] Mahlab U, Shamir J, Caulfield H J. Genetic algorithm for optical pattern recognition [J]. *Optics Letters*, 1991, 16(9): 648-650.
- [17] Reyes E N, Steidley C. Optimization using simulated annealing [C] // Northcon/98 Conference. IEEE, 1998:120-126.
- [18] Yang G Z, Dong B Z, Gu B Y, et al. Gerchberg-Saxton and Yang-Gu algorithms for phase retrieval in a nonunitary transform system: A comparison [J]. *Applied Optics*, 1994, 33(2): 209-218.
- [19] Zsolt J L. Three-dimensional beam shaping using diffractive optical elements [J]. *Proceedings of SPIE the International Society for Optical Engineering*, 2002, 4770:104-111.
- [20] Gerchberg R W. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures [J]. *Optik*, 1972, 35(2): 237-246.
- [21] Bengtsson J. Kinoform design with an optimal-rotation-angle method [J]. *Applied Optics*, 1994, 33 (29): 6879-6884.
- [22] Messaoudi H, Thiemicke F, Falldorf C, et al. Distortion-free laser beam shaping for material processing using a digital micromirror device [J]. *Production Engineering*, 2017, 11(3): 365-371.
- [23] Xu G S, Yang G. Distortion correction of image in integral stereolithography system [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2011, 63/64: 197-200.
- [24] Ageev E, Veiko V P, Vlasova E, et al. Controlled nanostructures formation on stainless steel by short laser pulses for products protection against falsification [J]. *Optics Express*, 2018, 26 (2) : 2117-2122.