

飞秒激光微加工中光斑横向超分辨研究

蔡建文^{1,2,3}, 潘雪涛^{1,4}, 张美凤¹, 孟飞¹

- (1. 常州工学院 光电工程学院, 江苏 常州 213002; 2. 常州现代光电技术研究院, 江苏 常州 213002;
3. 常州市光电子材料与器件重点实验室, 江苏 常州 213002;
4. 上海大学 机电工程与自动化学院, 上海 200072;)

摘要: 飞秒激光微加工中焦点光斑横向光场的分布直接影响到激光微加工的精度、分辨率和表面粗糙度等。利用激光束空间整形技术对激光束聚焦光斑进行调制, 基于横向超衍射理论和优化算法进行了研究和分析, 完成了一种 $0-\pi$ 结构四环横向相位板的设计。该相位板归一化半径为 $r_1=0.16$ 、 $r_2=0.27$ 、 $r_3=0.49$, 获得的峰值能量 S 、焦斑尺寸 G_T 、旁瓣能量 M_T 分别为 0.38、0.74、0.20。并且基于该相位板在激光微加工系统中进行了一种光致变色材料的相位板加入前后的对比加工实验, 实验结果表明, 在飞秒激光微加工系统中使用这种相位板可以有效地减小加工点的尺寸大小。

关键词: 横向超分辨; 飞秒激光; 微加工

中图分类号: O644 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)06-1790-04

Transverse spot superresolution in femtosecond laser microfabrication

Cai Jianwen^{1,2,3}, Pan Xuetao^{1,4}, Zhang Meifeng¹, Meng Fei¹

- (1. School of Photoelectric Engineering, Changzhou Institute of Technology, Changzhou 213002, China;
2. Changzhou Institute of Modern Photoelectric Technology, Changzhou 213002, China;
3. Changzhou Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Devices, Changzhou 213002, China;
4. School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: In femtosecond laser micromachining lateral distribution of the focus light spot directly affects laser machining accuracy, resolution and surface roughness. Focused spot was modulated by using laser beam spatial shaping technology, lateral ultra diffraction theory was studied and analyzed, One kind of tetracyclic lateral modulation phase plate was designed by using optimization algorithms. The radiuses of the phase plane are $r_1=0.16$ 、 $r_2=0.27$ 、 $r_3=0.49$, the peak energy S is 0.38, the focal spot size G_T is 0.74, sidelobe energy M_T is 0.20. The experiments were processed using a photochromic material before and after adding the phase plate in a laser micromachining system, the experiments results show that the performance of this super-diffraction phase element is particularly desirable in the femtosecond laser micromachining system, which can reduce the size of the point.

Key words: transverse superresolution; femtosecond laser; microfabrication

收稿日期: 2014-10-18; 修订日期: 2014-11-21

基金项目: 常州现代光电技术研究院开放课题(CZGY008)

作者简介: 蔡建文(1978-), 男, 副教授, 博士, 主要从事双光子三维光信息存储、激光微加工、光电检测等方面的研究。

Email: caijw@ustc.edu.cn

0 引言

20世纪80年代出现了一种新型飞秒激光技术,由于它具有较高的瞬间功率^[1]和较小的脉宽,目前正越来越多地应用于微纳加工领域。在飞秒激光加工过程中,加工材料具有比较小的热变形,因此可以获得亚微米级别的直线与点,从而加工出多功能微纳零部件。而飞秒激光加工时光斑光场的分布将严重影响加工点精度、分辨率和表面粗糙度等。为了提高激光微加工的精度、分辨率和表面粗糙度,有必要对焦斑进行整形,实现横向超衍射。

利用激光束空间整形技术可以对激光束聚焦光斑进行调制。在光路中加入光瞳滤波器(相位板)可实现激光光斑整形,通过相位调制技术和光瞳阻挡可以改变衍射光斑的空间能量分布,最终使中心零级斑尺寸大小得到降低。光瞳遮挡通常采用振幅型光瞳滤波器,从而减小衍射光斑大小;相位调制技术一般采用相位型光瞳滤波器,通过对相位分布的调制来重新分布光斑能量。相位型光瞳滤波器技术最早由 Toraldo^[2-3]提出,设计过程中采用同心环形光瞳,并且把光瞳滤波器分成具有复透过率的同心环组合,因此可获得任意形式的横向衍射光斑。如美国 Sales 小组^[4-5]和澳大利亚 Sheppard 小组^[6]均通过采用超分辨光瞳滤波器方法来提高光学系统的横向与轴向分辨率。国内清华大学课题组针对径向偏振光入射设计了三维超分辨衍射光学元件^[7];北京航空航天大学课题组提出基于激发能量与自由基理论来研究超分辨^[8];西安电子科技大学进行了位相型横向超分辨光瞳滤波器的研究工作^[9]。

文中重点研究和分析了超衍射理论,通过优化算法设计了一种二元相位元件,从而实现横向超衍射;并且在激光微加工系统中进行了一种光致变色材料的相位板加入前后的对比加工实验,实验结果表明,在飞秒激光微加工系统中加入这种相位板可以减小加工点的尺寸大小。

1 横向超分辨机理

在飞秒激光微加工系统中,加工点光斑的大小理论上由波长、数值孔径等因素决定。由于衍射效应的制约,光斑尺寸大约只能降低到光波波长的一半,

这已接近瑞利分辨的极限。为了减小加工点光斑的大小,在物镜前加入一 Toraldo 型光瞳滤波器,用以调制光斑获取更高的横向分辨率,光路如图1所示。

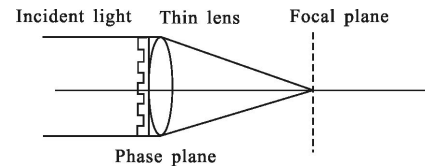


图1 激光微加工系统中加入相位板

Fig.1 Adding a phase plate in laser microfabrication system

光路中加入的光瞳滤波器可以改变入射光的相位,从而实现焦平面光斑的整形。依据菲涅耳衍射理论,加入位相板后激光微加工焦平面处归一化光衍射场的横向点扩散函数(PSF)为:

$$U(v)=2 \int_0^1 P(\rho) J_0(v\rho) \rho d\rho \quad (1)$$

式中:横向归一化坐标 $v=\frac{2\pi NA r}{\lambda}$;焦平面上复光瞳函数 $P(\rho)$ 通常可表示为 $P(\rho)=A(\rho)\exp[i\varphi(\rho)]$,其中, $A(\rho)$ 为振幅透过率, $\exp(i\varphi(\rho))$ 为相位透过率, ρ 为相位板上的坐标。

对公式(1)中的零阶贝塞尔函数进行泰勒展开,可得到

$$U(v)=2 \int_0^1 A(\rho)\exp[i\varphi(\rho)] \left(1 - \left(\frac{v\rho}{2}\right)^2 + \dots\right) \rho d\rho = 2 \int_0^1 A(\rho)\exp[i\varphi(\rho)] \rho d\rho - \frac{v^2}{2} \int_0^1 A(\rho)\exp[i\varphi(\rho)] \rho^3 d\rho + \dots \quad (2)$$

令 I_m 表示光瞳函数的 m 阶矩:

$$I_m=2 \int_0^1 P(\rho) \rho^{2m+1} d\rho \quad (3)$$

将公式(3)代入公式(2)可得:

$$U(v)=I_0 - \frac{v^2}{4} I_2 + \dots \quad (4)$$

因此,焦平面上的光斑光强分布可表示为:

$$I(v)=|U(v)|^2=|I_0|^2 - \frac{v^2}{2} \operatorname{Re}(I_0 I_2^*) + \dots \quad (5)$$

从公式(5)可以看出,调制后的光强分布对称于 $v=0$ 分布。

采用横向增益 G_T 、峰值能量比 S 和旁瓣能量 M_T

表征位相板光束横向整形的效果。其中, G_T 为整形后与整形前横向光斑大小之比, S 为整形后与整形前中心峰值能量之比, M_T 为除去中心光强外的最大旁瓣光强与中心峰值强度之比。

对于复透过率位相板, 激光加工系统经过光斑调制后光强峰值会偏移物镜焦平面, 产生离焦现象, 可对公式(1)进行相应处理, 通过控制调制后的离焦量 u_f 使系统焦平面与薄透镜焦平面近似重合。

离焦量

$$u_f = -\frac{2\text{Im}(I_0 I_1^*)}{\text{Re}(I_0 I_2^*) - |I_1|^2} \quad (6)$$

沿横向强度分布的峰值能量比为:

$$S = |I_0|^2 - \text{Im}(I_0 I_1^*) u_f \quad (7)$$

横向焦斑尺寸 G_T 为:

$$G_T = \sqrt{\frac{S}{2[\text{Re}(I_0 I_1^*) - u_f \text{Im}(I_2 I_0^*)]}} \quad (8)$$

在进行优化设计的过程中, 如同时满足 $u_f < a$ (a 为可接受的较小误差量), $S > b$ (b 为满足要求的光强值)、 $0 < \rho_1 < \dots < \rho_{n-1}$ 和 $0 < \varphi_1 < \dots < \varphi_{n-1} < 1$, 可获得理想的横向调制光斑。

2 横向超分辨仿真

为了实现飞秒激光加工中横向超分辨, 采用 $0-\pi$ 结构的四环相位板, 这种相位板由若干环带组成, 每个环带的相位依次为 $0, \pi, 0, \pi$ 。采用遗传算法与全局优化算法^[10]相结合, 依照横向光斑优化约束条件设计出一种四环型 $0-\pi$ 结构的相位板。该相位板的归一化半径为 $r_1=0.16, r_2=0.27, r_3=0.49$, 获得的峰值能量 S 、焦斑尺寸 G_T 、旁瓣能量 M_T 为 $0.38, 0.74, 0.20$ 。调制前后的横向光强分布如图 2 所示, 光斑轴向强度分布如图 3 所示。从图中可以看出, 这种超

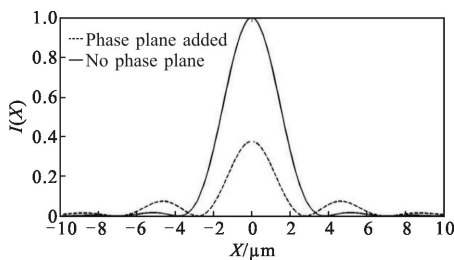


图 2 调制光斑与艾里斑的光强横向分布比较
Fig.2 Intensity distribution of modulation spot and Airy disk along lateral direction

衍射相位板对横向光斑进行压缩的同时对纵向光斑效果甚微, 甚至纵向光斑还有所变大, 这种相位板最好应用于对横向光斑要求较高而对纵向光斑大小要求较小的应用领域。

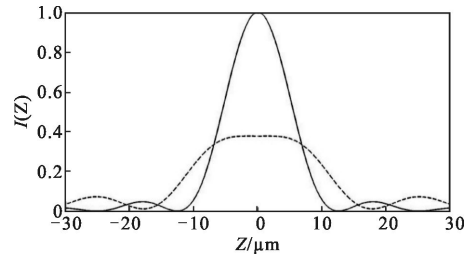
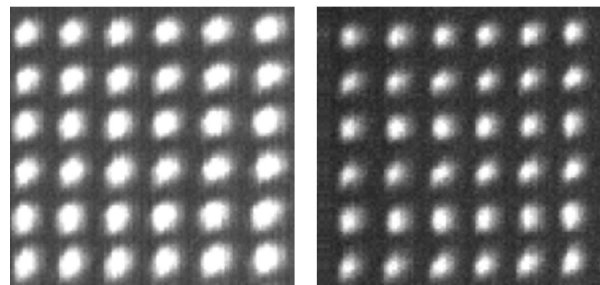


图 3 纵向调制光斑与艾里斑的光强分布比较
Fig.3 Intensity distribution of modulation spot and Airy disk along axial direction

3 横向超分辨实验

根据上述理论分析, 基于自行搭建的飞秒激光微加工系统, 飞秒激光参数如下: 中心波长 800 nm , 重复频率 80 MHz , 脉宽 80 fs , 加工物镜 $NA=0.65$, 对一种光致变色材料进行相位板加入前后的对比实验。图 4(a) 为激光微加工系统未加入超分辨相位板的情况下, 加工深度为 $10 \mu\text{m}$ 时加工点的横向读出图像, 平均写入激光功率为 25 mW , 曝光时间为 30 ms , 读出功率为 5 mW , 加工点尺寸大小为 $1.4 \mu\text{m}$ 。图 4(b) 为在激光微加工系统中加入上面设计的超分辨相位板后, 加工深度为 $10 \mu\text{m}$ 时加工点的横向读出图像,



(a) 未加相位板 (b) 加上相位板
(a) Without phase plate (b) Phase plate added

图 4 激光微加工系统中相位板加入前后光斑尺寸对比
Fig.4 Spot size comparison before and after adding phase plate in laser microfabrication system

平均写入激光功率为 25 mW , 曝光时间为 30 ms , 读出功率为 5 mW , 加工点尺寸大小为 $1.1 \mu\text{m}$ 。从图中可以看出: 在激光微加工系统中加入超分辨相位板

后,加工点尺寸明显变小,横向光斑压缩比例与理论计算结果近似。说明理论模拟结果与实验现象完全吻合。从实验中可以看出,通过加入相位调制板,可以获得更小的加工点尺寸,在加工复杂零部件时,由于调制后的光斑尺寸更小,加工零件可以拥有更加紧密的扫描排布,从而可以提高加工精度和加工质量。

4 结 论

研究了飞秒激光微加工光斑横向超衍射机理,基于菲涅耳衍射理论建立了光斑横向整形的数学模型,运用全局优化算法与遗传算法对相位板的关键参数进行了优化设计,获得了一种四环 $0-\pi$ 结构的横向相位板,该相位板的归一化半径为 $r_1=0.16$, $r_2=0.27$, $r_3=0.49$ 。并对光斑横向整形的效果进行了数值模拟,峰值能量 S 为0.38,焦斑尺寸 G_T 为0.74,旁瓣能量 M_T 为0.20。基于自行搭建的飞秒激光微加工系统,对一种光致变色材料进行相位板加入前后的对比加工实验,对比实验结果表明,加入相位板对激光束进行横向整形后,加工点横向尺寸明显变小,光斑压缩比例与理论计算结果基本吻合。光斑横向整形后,加工点光斑尺寸变小,横向的加工点分布密度增大,提高了加工分辨率。因此,理论与实验研究的结论对有效地改善微器件的加工精度和表面质量,更好地保证微器件的装配精度和功能具有良好的现实意义。

参考文献:

- [1] Chen Guofu, Cheng Guanghua, Ling Weijun. Generation and amplification of femtosecond laser technology[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(2): 195-199. (in Chinese) 陈国夫,程光华,令维军.飞秒激光产生与放大技术[J].*红外与激光工程*, 2008, 37(2): 195-199.
- [2] Toraldo di Francia G. Super-gain antennas and optical resolving power [J]. *Nuovo Cimento Suppl*, 1953, 9: 426-435.
- [3] Toraldo di Francia G. Resolving power and information[J]. *JOSA*, 1955, 45(7): 497-499.
- [4] Tasso R M Sales. Smallest focal spot [J]. *Physical Review Letters*, 1998, 81(18): 3844-3847.
- [5] Tasso R M Sales, G Michael Morris. Fundamental limits of optical superresolution[J]. *Optics Letters*, 1997, 22(9): 582-584.
- [6] Sheppard C J R. Synthesis of filters for specified axial properties[J]. *J Mod Optics*, 1996, 43: 525-536.
- [7] Cheng Kan, Tan Qiaofeng, Zhou Zehai, et al. Design of three-dimensional superresolution diffractive optical elements for radially polarized beam[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(11): 3295-3299. (in Chinese) 程侃,谭峭峰,周哲海,等.径向偏振光三维超分辨衍射光学元件设计[J].*光学学报*, 2010, 30(11): 3295-3299.
- [8] Wei P, Tan O F, Zhu Y, et al. Axial superresolution of two-photon microfabrication [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(18): 3694-3699.
- [9] Ding Hongping, Li Qinghui, Zhou Wenyi. Optimization design of phase-only transverse superresolution filters [J]. *Journal of Xidian University*, 2005, 32(1): 126-129. (in Chinese) 丁洪萍,李庆辉,邹文艺.位相型横向超分辨光瞳滤波器的优化设计[J].*西安电子科技大学学报*, 2005, 32(1): 126-129.
- [10] Gu Jun. Global optimization for satisfiability (SAT)problem [J]. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 1994, 6(3): 361-381.