

三波长同轴输出皮秒激光精细加工系统的研制及其应用

刘洋^{1,2} 余锦¹ 张雪¹ 郝泽强^{1,2} 聂树真¹ 黄玉涛¹ 樊仲维^{1,3} 陈波⁴

¹ 中国科学院光电研究院, 北京 100094; ² 中国科学院大学, 北京 100049

³ 北京国科世纪激光技术有限公司, 北京 100192

⁴ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033

摘要 为了满足不同材料的精细加工需求,采用三波长皮秒激光器作为光源,配合自行设计的光学系统和控制系统,研制了三波长同轴输出皮秒激光精细加工系统。该系统可使用任意一种、两种或三种激光波长进行同工作距加工,通过轴向色差补偿设计,实现轴向焦点补偿最大距离 0.4 mm,最小焦斑直径为 3 μm 。初步探讨了该系统在微电子行业的应用,进行了铜电极板、手机屏的切割实验以及位置敏感阳极探测器图形制作,实验证明该系统可满足多种材料的精细加工要求。

关键词 激光技术;三波长激光器;皮秒激光;精细加工

中图分类号 TN249 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP50.051402

Investigation and Application of Coaxial Output Three-Wavelength Picosecond Laser Micro-Machining System

Liu Yang^{1,2} Yu Jin¹ Zhang Xue¹ Mo Zeqiang^{1,2} Nie Shuzhen¹ Huang Yutao¹
Fan Zhongwei^{1,3} Chen Bo⁴

¹ Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

³ Beijing GK Laser Technology Co., Ltd., Beijing 100192, China

⁴ State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

Abstract In order to satisfy micro-machining requirements of different materials, a coaxial output three-wavelength picosecond laser micro-machining system is designed with three-wavelength picosecond laser, self-designed optics system and control system. This system can use any one, two or three of the laser wavelengths to process at the same working distance. Through the axial chromatic aberration compensation design, the maximum distance of axial focus compensation is 0.4 mm, and the diameter of the minimum focal spot is 3 μm . With this system, the experiments of cutting copper electrode plates and mobile phone screen and fabricating graphics for position-sensitive anode detector have been carried out. Experiments show that the system can satisfy the micro-machining requirements of many materials.

Key words laser technique; three-wavelength laser; picosecond laser; micro-machining

OCIS codes 140.7090; 130.6750; 350.3850; 220.4830

1 引言

皮秒脉冲激光由于脉宽短、峰值功率高,已经在激光加工领域被研究者所重视^[1,2]。如果将皮秒脉冲

收稿日期: 2013-01-09; 收到修改稿日期: 2013-01-28; 网络出版日期: 2013-04-08

基金项目: 中国科学院科研装备研制项目(Y2010008)和国家 863 计划(2011AA030205)资助课题。

作者简介: 刘洋(1983—),男,助理研究员,博士研究生,主要从事激光技术及应用等方面的研究。

E-mail: liyang@aoe.ac.cn

导师简介: 余锦(1971—),男,博士,研究员,主要从事激光技术及应用等方面的研究。

E-mail: jinyu@aoe.ac.cn(通信联系人)

激光光斑聚焦到微米量级,光功率密度可达到 10^{15} W/cm²,其与物质相互作用时呈现强烈的非线性效应,主要依靠多光子吸收机制来加工一些长脉冲无法加工的材料^[3~6]。并且,一般物质的能量分布平衡弛豫时间在 10 ps 以内,因此当脉冲宽度小于 10 ps 的脉冲作用于物质时,热量沉积过程可能比热量扩散过程还要快速,这样就可以有效减小热效应^[7]。同时,脉冲宽度小于 10 ps 的脉冲激光可避免在待加工材料前的空气中发生等离子体效应和由此引起的光束变形和散射,可更有效地控制加工精度^[8]。正是由于这些优点,皮秒脉冲激光在单晶硅片划切、树脂基板穿孔、金刚石切割、介质膜损伤修复和光学微器件制造等激光精细加工领域备受青睐^[9~13]。但是单一波长的激光光源加工具有一定的局限性。例如某些金属材料对近红外区的激光有较高的吸收率^[6,14,15],但近红外激光会聚后的艾里斑大,无法保证加工精度。而对于短波长的紫外激光,虽然聚焦后的艾里斑小,但由于其与光学玻璃、石英等材料作用时产生共振吸收效应,使得紫外激光加工只能停留在材料表面的一维和二维操作,空间方位选择能力差^[16]。因此,在激光加工过程中通常会根据加工材料以及加工要求的不同而选择不同的激光光源。

基于此,本文采用三波长输出皮秒激光器作为光源,配合自行设计的光学系统、控制系统,研制开发了一套三波长同轴输出皮秒激光精细加工系统。该系统可使用任意一种、两种或三种波长进行加工,可满足大多数材料的精细加工需求。同时通过轴向色差补偿设计,该系统加工时不需要更换聚焦物镜,也不需要调整工作距离,提高了操作的便利性。初步探讨了该系统刻划位置敏感阳极探测器图形中的应用。

2 原理与系统的构成

2.1 加工系统原理

三波长同轴输出皮秒激光精细加工系统主要由计算机、三波长皮秒激光器、光束传输系统、扩束聚焦系统、电动平台和监测系统共六部分组成,原理如图 1 所示。三波长皮秒激光器可同时或分时输出 1064 nm、532 nm 和 355 nm 激光。其中,1064 nm 的激光经扩束器扩束后被反射镜 M1 反射,透过 M2 经 M3 反射后,再经 M4 反射进入聚焦物镜 lens 1 聚焦到被加工件表面上。532 nm 激光经滤光镜后经扩束器扩束后被 M2、M3、M4 反射进入聚焦物镜 lens 1 聚焦到被加工件表面上。355 nm 激光经滤光镜后经扩束器扩束,透过 M3,由 M4 反射进入聚焦物镜 lens 1 聚焦到被加工件表面上。加工过程可由 CCD 实时监测。其中,M1,M2,M3,M4 均为 45°反射镜,M1 镀 1064 nm 高反膜,M2 镀 1064 nm 增透膜、532 nm 高反膜,M3 镀 355 nm 增透膜、532 nm 和 1064 nm 高反膜,M4 镀 1064、532、355 nm 高反膜。

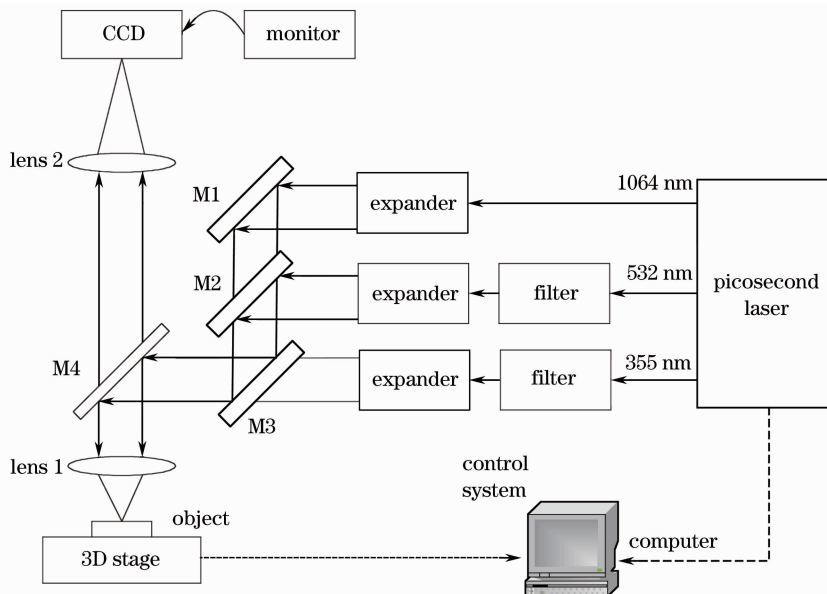


图 1 加工系统原理图

Fig. 1 Principle schematic of machining system

聚焦后的皮秒激光照射在被加工件的表面,光能转换为热能,在极短时间内光斑聚焦区域的温度迅速升高,若皮秒激光脉冲宽度小于 10 ps,则加工材料被直接汽化。被加工件固定在三维(3D)精密位移台上,随着激光束与工件的相对移动,激光与工件材料不断相互作用,实现材料的去除。

2.2 系统的构成

2.2.1 三波长皮秒激光器

该加工系统的主要构成部件为三波长皮秒激光器。该激光器为自行研制的激光器,光路图如图 2 所示。将 0.86 W,80 MHz,8.94 ps 的种子光通过一级再生放大获得 3 W 的基频光输出后再经过三级功率放大获得 15 W 基频激光,经二倍频和三倍频后获得 10 W 的 532 nm 和 4 W 的 355 nm 激光输出。激光增益晶体均为 Nd:YVO₄,倍频晶体为 LBO。该激光器主要性能参数为如表 1 所示。

表 1 三波长皮秒激光器主要性能参数

Table 1 Typical parameters of three-wavelength picosecond laser

Wavelength /nm	1064/532/355
Power /W	15/10/5
Frequency /kHz	1~10
Pulse width /ps	8.94
Power stability /%	±1.5
Beam quality M^2 at 355 nm	1.4
Beam divergence /mrad	0.5

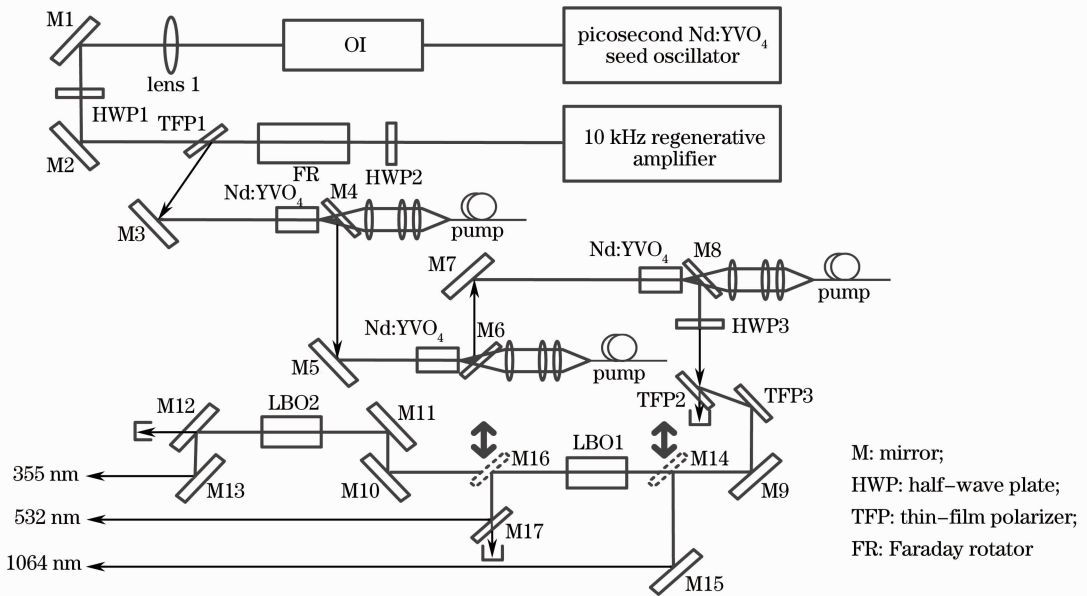


图 2 三波长皮秒激光器光路图

Fig. 2 Structure of three-wavelength picosecond laser

三波长皮秒激光器在 10 kHz 重复频率下,平均功率分别为 15 W (1064 nm)、10 W (532 nm)、4 W (355 nm)和单脉冲能量分别可达 1.5、1.0、0.4 mJ,脉宽宽度 8.94 ps,峰值功率分别为 168、112、45 MW。

2.2.2 轴向色差补偿系统

三波长同轴加工系统中波长范围较宽,因此激光在通过聚焦物镜聚焦后必定会产生色差。其中垂轴色差可通过聚焦物镜的优化设计来消除,而轴向色差是不可避免的。轴向色差的存在将对加工系统的焦点位置产生影响,即各波长焦点位置不同,且焦点位置也不可控。为了解决这一问题,先将三波长激光分束,在各波长分束光路中加入不同的扩束镜组进行扩束后再合束。该扩束镜组中的光学元件经过分别设计和精密控制,既可以增加入瞳孔径、降低聚焦光斑焦点大小,又可以分别控制各波长的焦点位置。图 3 为焦点控制示意图。

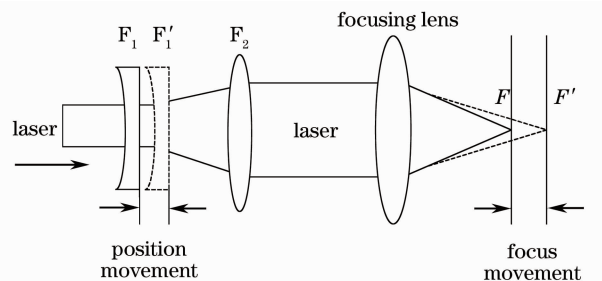


图 3 焦点控制示意图

Fig. 3 Schematic of focus control

透镜 F_1 和 F_2 组成了激光扩束系统,激光通过 F_1 和 F_2 后经聚焦物镜聚焦到 F 点处。当 F_1 的位置移动到 F_1' 时, F 点的位置也随之改变到 F' ,即轴向色差得到了补偿。聚焦物镜的设计主要是通过轴向色差补偿后使聚焦光斑最小,通常要求达到衍射极限。焦斑半径大小为

$$r = M^2 \times 1.22 \times \frac{\lambda \times f}{D},$$

式中 M^2 为光束质量因子, λ 为激光波长, f 和 D 分别为聚焦物镜的焦距和通光口径。

由上式可知,在激光波长一定的情况下,焦斑半径大小 r 与聚焦物镜的焦距 f 及激光 M^2 值成正比,与聚焦物镜的通光口径 D 成反比。对光学系统进行设计,聚焦物镜焦距 25 mm,通光口径 12 mm,设计后,各波长的焦点位置可控,且不影响焦斑大小。图 4 为光学设计中光程差(OPD)曲线变化的模拟结果。图 4(a)和(b)给出激光波长为 1064 nm 时扩束镜组中镜片间距增加 1.04 mm,工作距由 20.00 mm 到 19.60 mm 的 OPD 曲线变化,OPD 值为 $\pm(\lambda/20)$,没有变化。图 4(c)和(d)给出激光波长为 532 nm 时扩束镜组中镜片间距增加 1.21 mm,工作距由 20.00 mm 到 19.60 mm 的 OPD 曲线变化,OPD 值为由 $\pm(\lambda/20)$ 变化到 $\pm(\lambda/10)$,OPD 值减小,由于值均小于 $\lambda/4$,故焦斑质量和大小没有变化。图 4(e)和(f)给出激光波长为 355 nm 时扩束镜组中镜片间距增加 2.03 mm,工作距由 20.00 mm 到 19.60 mm 的 OPD 曲线变化,OPD 值由 $\pm(\lambda/20)$ 变化到 $\pm(\lambda/10)$,OPD 值减小,由于值均小于 $(\lambda/4)$,故焦斑质量和大小没有变化。该系统焦点轴向补偿最大距离为 0.4 mm。

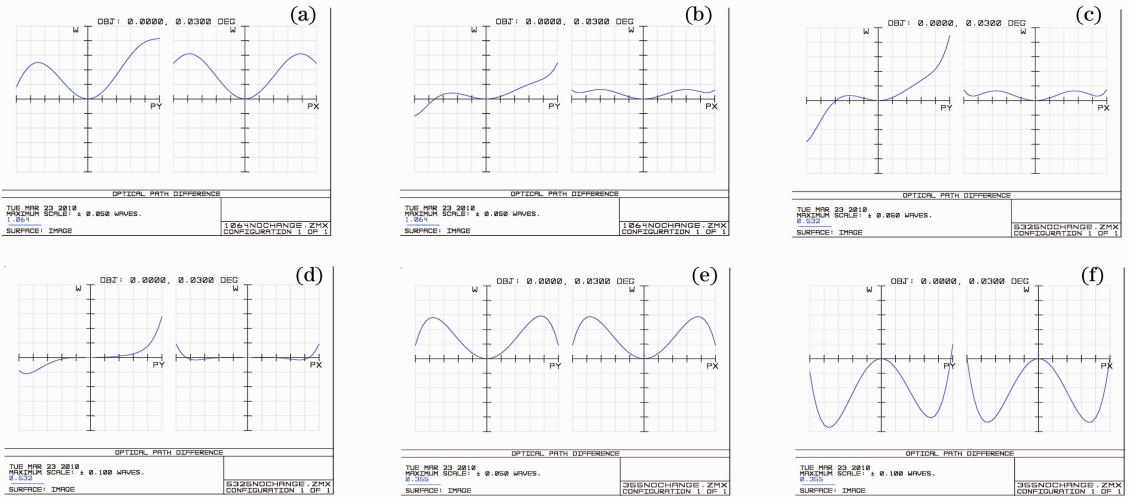


图 4 波长为 1064/532/355 nm 时工作距 D_w 为 20.00 mm 和 19.60 mm 处的 OPD 曲线。(a) $\lambda=1064$ nm, $D_w=20.00$ mm; (b) $\lambda=1064$ nm, $D_w=19.60$ mm; (c) $\lambda=532$ nm, $D_w=20.00$ mm; (d) $\lambda=532$ nm, $D_w=19.60$ mm; (e) $\lambda=355$ nm, $D_w=20.00$ mm; (f) $\lambda=355$ nm, $D_w=19.60$ mm

Fig. 4 OPD curves at working distance D_w 20.00 mm and 19.60 mm for laser wavelengths of 1064/532/355 nm. (a) $\lambda=1064$ nm, $D_w=20.00$ mm; (b) $\lambda=1064$ nm, $D_w=19.60$ mm; (c) $\lambda=532$ nm, $D_w=20.00$ mm; (d) $\lambda=532$ nm, $D_w=19.60$ mm; (e) $\lambda=355$ nm, $D_w=20.00$ mm; (f) $\lambda=355$ nm, $D_w=19.60$ mm

本系统中,皮秒激光器光束质量为 $M^2=1.4$ (355 nm),因此焦斑大小理论上应该为 $2.53 \mu\text{m}$,通过实验

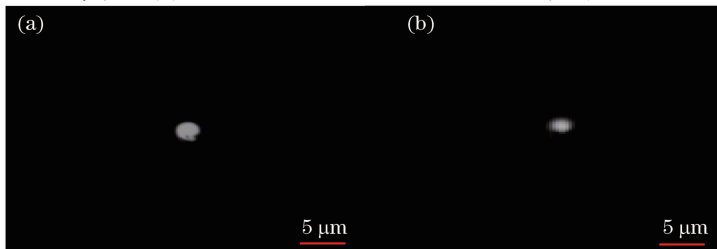


图 5 355 nm 聚焦光斑。(a) $D_w=20.00$ mm; (b) $D_w=19.60$ mm

Fig. 5 355 nm focal spot. (a) $D_w=20.00$ mm; (b) $D_w=19.60$ mm

测得的工作距离在 20.00 mm 及 19.60 mm 处的光斑大小均为 $3\ \mu\text{m}$, 如图 5 所示。

2.2.3 控制系统

控制系统由计算机、激光器控制卡、伺服控制卡和相应的控制软件组成,它是本加工系统的一个重要单元,其作用主要是对激光器、电动平台等各单元进行控制,保证整个加工系统能够协调一致地运转。原理框图如图 6 所示。

其工作原理为控制指令通过控制软件输入计算机,计算机将接收到的控制指令经过运算后产生两路控制信号:一路送给伺服控制卡,并通过伺服控制卡控制激光器的工作状态,包括激光器的启动与停止、输出功率大小和输出频率大小等;第二路伺服系统控制工作台在 x 、 y 和 z 轴方向的移动及速度。通过调节激光器的输出功率、频率和电动平台移动速度,就可以保证加工的精细度。

2.3 整机性能

三波长同轴输出皮秒激光精细加工系统性能如表 2 所示。最大加工范围 $100\ \text{mm} \times 100\ \text{mm}$,最大加工厚度 $500\ \mu\text{m}$,最小焦斑直径 $3\ \mu\text{m}$,最大峰值功率密度 $2.4 \times 10^{15}\ \text{W}/\text{cm}^2$,加工直线度为 $2.53\ \mu\text{m}/100\ \text{mm}$,最大加工速度 $100\ \text{mm}/\text{s}$ 。其中加工范围、加工直线度以及加工速度由高精度三维电动平移台 Newport ILS100 决定。图 7 为用最小光斑在铜板上刻线的结果,线宽约为 $3\ \mu\text{m}$,与最小光斑大小一致,说明在铜板上刻划时,基本没有产生烧蚀现象。图 8 为三

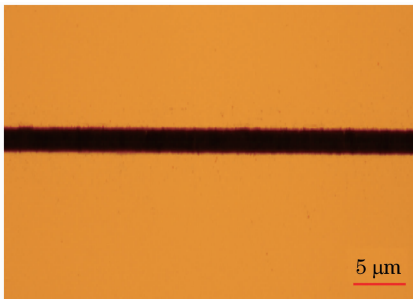


图 7 355 nm 聚焦光斑在铜板上的刻线

Fig. 7 Cutting line with 355 nm laser focal spot on copper plate

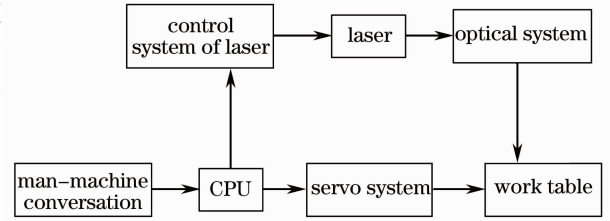


图 6 控制系统结构框图

Fig. 6 Structure of control system

波长同轴输出皮秒激光精细加工系统样机。

表 2 精细加工系统整机性能

Table 2 Typical parameters of the micro-machining system

Maximum machining area /mm	100×100
Maximum machining thickness / μm	500
Minimum focal spot / μm	3
Maximum peak power density /(W/cm^2)	2.4×10^{15}
Machining precision /($\mu\text{m}/\text{mm}$)	2.5/100
Maximum machining speed /(mm/s)	100



图 8 三波长同轴输出皮秒激光精细加工系统

Fig. 8 Coaxial output three-wavelength picosecond laser micro-machining system

3 应用实例

3.1 铜电极板及手机屏切割

在脉冲宽度和重复频率一定时,改变加工速度,意味着改变激光的能量密度。加工速度越快,辐射面的激光能量密度越小,反之激光能量密度越大。当加工速度增大到一定值的时候,辐射面的激光能量积累不足以使材料完全熔化或者汽化,所以不能完全去除材料;而当速度减小到某一范围时,激光能量积累足够大,可以使被照射材料完全熔化或汽化;当速度继续下降时,激光能量积累太大,使得切缝周围的材料也被熔化或汽化,导致出现熔渣或切线边缘粗糙不均匀,切割质量下降。因此,在脉冲宽度和重复频率一定时,存在最佳的切割速度^[14]。采用三波长同轴输出皮秒激光精细加工系统对 $200\ \mu\text{m}$ 厚的铜电极板及 $500\ \mu\text{m}$ 厚的手机屏进行切割实验,实验结果如图 9 所示。考虑到铜对 355 nm 光的吸收率最高且厚度为 $200\ \mu\text{m}$,因此选用 355 nm 皮秒激光为光源,以功率 2 W、重复频率 10 kHz、速度 10 mm/s 进行切割,在 500 倍工具显微镜下的

效果图如图 9(a)所示。从图中看到电极板切割剖面抗氧化层和电极层清晰可分,且没有变形,切割效果好。手机屏由于厚度较厚,且使用 Gorilla 材料,主要成分为钠和钙,故采用 1064 nm 皮秒激光做光源,以功率 10 W、重复频率 10 kHz、速度 6 mm/s 进行切割,在 500 倍工具显微镜下的效果图如图 9(b)所示,从图中可看到切割线边缘平整无毛刺。

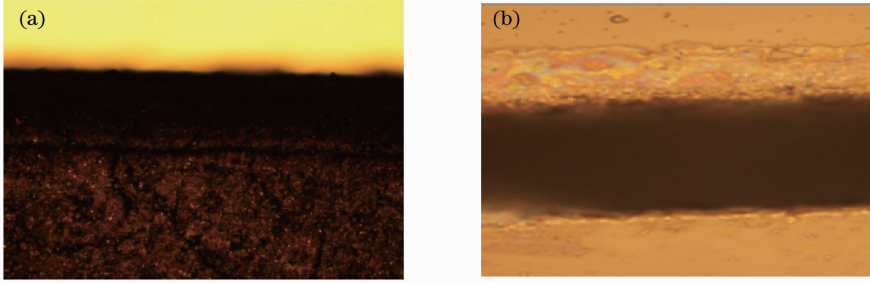


图 9 加工效果图。(a) 355 nm, 0.2 mJ, 10 kHz, 10 mm/s 切割铜电极板;(b) 1064 nm, 1 mJ, 10 kHz, 6 mm/s 切割手机屏

Fig. 9 Image of machining effect. (a) 355 nm, 0.2 mJ, 10 kHz, 10 mm/s cutting copper electrode;

(b) 1064 nm, 1 mJ, 10 kHz, 6 mm/s cutting mobile phone screen

3.2 位置敏感阳极探测器图形加工

楔条形阳极(WSA)探测器是由镀在石英玻璃或陶瓷基底等绝缘材料上的特定金属材料构成的多阳极接收器,并且利用不同的电极图案来实现电荷的分配与电子云的二维测量。图 10 给出了三电极的 WSA 阳极探测器的几何简图:楔形(W: wedge)电极、条纹形(S: strip)电极以及在 W 和 S 之间的之字形(Z: zigzag)电极,W、S、Z 三个电极间由数十微米宽的绝缘沟隔开。

WSA 探测器的电极厚度一般在微米级,而用于精密光刻的镀膜厚度则一般在纳米级,所以无法对微米级厚度的电极层进行直接光刻。为了制作精细尺寸结构且厚度为微米级的电极,目前公开报道有两种可操作的工艺方法。第一种方法是“先光刻腐蚀,后电镀增厚”,即先在石英玻璃或是陶瓷基底上镀一缓冲层(多为铬层),然后光刻腐蚀缓冲层,最后对已光刻腐蚀好的缓冲层进行电镀增厚;第二种方法是“先电镀增厚,后光刻腐蚀”,即先对缓冲层进行电镀增厚,然后再对缓冲层和电镀增厚层一起进行化学湿法腐蚀。由于这两种方法均采用化学腐蚀,因此精度难以控制,极易使 W、S、Z 三个电极相互导通,制作成品率低。同时,光刻时 99% 的能量被掩模板损耗,能量利用效率极低。本系统既不需要光刻掩模也不需要化学腐蚀,利用 532 nm 皮秒脉冲通过聚焦物镜直接作用于基板上刻画 WSA 探测器图形,图 11 为 100 倍工具显微镜下的加工效果图,基板材料为石英,阳极材料为铝,电阻膜为锗。从图中可看出,刻划线宽约 50 μm ,刻线边缘光滑平整。

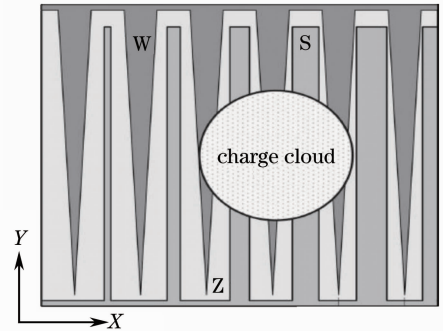


图 10 三电极的 WSA 探测器几何简图

Fig. 10 Schematic diagram of three-electrode geometry of WSA detector

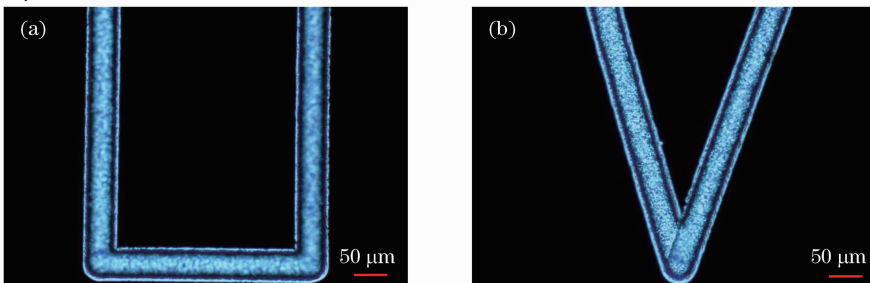


图 11 WSA 探测器加工效果图。(a) S 电极;(b) Z 电极

Fig. 11 Image of machining effect of WSA detector. (a) S electrode;(b) Z electrode

4 结 论

采用 355、532、1064 nm 三波长皮秒激光器作为光源,配合自行设计的光学系统和控制系统,研制了三波长同轴输出皮秒激光精细加工系统。该系统可使用任意一种、两种或三种激光波长进行同工作距离加工,通过轴向色差补偿设计,实现轴向焦点补偿最大距离 0.4 mm,最小焦斑直径为 3 μm 。进行了铜电极板、手机屏的切割实验以及 WSA 位置敏感阳极探测器图形的制作,实验证明该系统可满足多种材料的精细加工要求。

参 考 文 献

- 1 P. Dupriez, J. K. Sahu, A. Malinowski *et al.*, 80 W green laser base on a frequency-double picoseconds, single-mode, linearly-polarized fiber laser[C]. Washington, D. C., CLEO, 2006. CThJ1
- 2 Ma Yufeng, Yu Jin, Niu Gang *et al.*, 25 W high repetition rate picoseconds green laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(12): 1202010
麻云凤, 余 锦, 牛 岗 等. 高重复频率 25 W 皮秒绿光激光器[J]. 中国激光, 2011, **38**(12): 1202010
- 3 G. Dumitru, V. Romano, H. P. Weber. Femtosecond ablation of ultrahard materials[J]. *Appl. Phys. A*, 2002, **74**(6): 729~739
- 4 M. Meunier, B. Fiset, A. Houle *et al.*, Processing of metals and semiconductors by a femtosecond laser-based microfabrication system[C]. *SPIE*, 2003, **4978**: 1~11
- 5 Zhao Gang, Hao Qiulong, Qi Wenzong *et al.*, Thermal behavior of thin metal films irradiated by ultra-short pulse laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(1): 9~12
赵 刚, 郝秋龙, 齐文宗 等. 超短脉冲激光辐照下金属薄膜的热行为[J]. 光子学报, 2007, **36**(1): 9~12
- 6 D. Von der Linde, K. S. Tinten, J. Bialkowski. Laser-solid interaction in the femtosecond time regime[J]. *Appl. Surf. Sci.*, 1997, 109-110: 1~10
- 7 F. Dausinger, H. Hügel, V. Konov. Micromachining with ultrashort laser pulses: from basic understanding to technical applications[C]. *SPIE*, 2003, **5147**: 106~115
- 8 Xiong Zhimin, Zhang Panzheng, Fan Wei *et al.*, Heat affection of picosecond laser irradiation with different widths on the dielectric film damage ablation[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(8): 0803005
熊智敏, 张攀政, 范 薇 等. 不同脉宽皮秒激光对介质膜损伤修复的热影响[J]. 中国激光, 2012, **39**(8): 0803005
- 9 Sun Xiaohun, Zhou Changhe. Fabrication of microoptical elements with femtosecond laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(1): 133~137
孙晓慧, 周常河. 飞秒激光加工微光学元件的研究[J]. 中国激光, 2006, **33**(1): 133~137
- 10 Li Ping, Wang Yu, Feng Guojin *et al.*, Study of silicon micro-structuring using ultra-short laser pulses[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(12): 1688~1691
李 平, 王 煜, 冯国进 等. 超短激光脉冲对硅表面微构造的研究[J]. 中国激光, 2006, **33**(12): 1688~1691
- 11 Liang Jianguo, Ni Xiaochang, Yang Li *et al.*, Numerical simulation of ablation on copper with ultrashort laser pulses[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(9): 1291~1294
梁建国, 倪晓昌, 杨 丽 等. 超短激光脉冲烧蚀铜材料的数值模拟[J]. 中国激光, 2005, **32**(9): 1291~1294
- 12 Ni Xiaochang, Wang Qingyue. Finite difference method for thermal analysis of femtosecond-picosecond pulse laser ablation on metal surface[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(3): 277~280
倪晓昌, 王清月. 飞秒、皮秒激光烧蚀金属表面的有限差分热分析[J]. 中国激光, 2004, **31**(3): 277~280
- 13 He Fei, Cheng Ya. Femtosecond laser micromachining: frontier in laser precision micromachining[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(5): 595~622
何 飞, 程 亚. 飞秒激光微加工:激光精密加工领域的新前沿[J]. 中国激光, 2007, **34**(5): 595~622
- 14 Liao Jianhong, Meng Hongyun, Wang Hongwei *et al.*, Investigation and applications of fiber laser precision cutting system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1): 135~138
廖健宏, 蒙红云, 王红卫 等. 光纤激光精密切割系统的研制及其应用[J]. 中国激光, 2007, **34**(1): 135~138
- 15 Satoshi Kawata, Sun Hongbo, Tomokazu Tanaka *et al.*, Finer features for functional microdevices[J]. *Nature*, 2001, **412**(6848): 697~698
- 16 J. Ihlemann. Excimer lasers ablation of fused silica[J]. *Appl. Surf. Sci.*, 1992, **54**: 193~200