

皮秒激光加工系统设计及实验研究

刘洋^{1,2} 余锦¹ 张雪¹ 黄玉涛¹ 樊仲维^{1,3} 貉泽强^{1,2}

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

摘要 设计了皮秒激光加工系统,该系统可输出 355、532、1064 nm 皮秒脉冲激光,单脉冲能量最大 1.5 mJ,脉冲宽度 9.12 ps。进行了轴向色差补偿设计,轴向焦点补偿最大距离 0.4 mm,最小焦斑直径为 3 μm,峰值功率密度达 0.6×10^{15} W/cm²。应用该系统,开展了不同波长与不同材料作用的加工实验研究。研究表明,1064 nm 皮秒脉冲激光可用于手机屏幕切割,532 nm 皮秒脉冲激光可用于光电探测器制作,355 nm 皮秒脉冲可用于精细度要求较高的金属类材料加工。

关键词 激光技术;皮秒激光;精细加工;色差补偿

中图分类号 TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.s103001

Design and Experimental Study of Picosecond Laser Machining System

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

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

Abstract A picosecond laser machining system is designed, which can output 355、532、1064 nm picosecond laser. The maximum single pulse energy is 1.5 mJ and the pulse width is 9.12 ps. Through the axial aberration compensation design, the maximum distance of axial focus compensation is 0.4 mm, the diameter of minimum focal spot is 3 μm and the maximum peak power density is 0.6×10^{15} W/cm². With this system, the machining experiment of different wavelengths and different materials is completed. The results show that 1064 nm picosecond laser can be used to cut mobile phone screen, 532 nm picosecond laser can be used to product photoelectricity detector and 355 nm picosecond laser can satisfy micro-machining requirements of metal materials.

Key words laser technique; picosecond laser; micro-machining; aberration compensation

OCIS codes 130.6750; 350.3850; 220.4830; 140.7090

1 引言

皮秒、飞秒脉冲激光在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^[1-5]。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^[6]。同时,脉冲宽度小于 10 ps 的脉冲激光可避免

收稿日期: 2013-03-20; **收到修改稿日期**: 2013-05-20

基金项目: 中国科学院科研装备研制项目(Y2010008)、吉林省世行贷款项目(P101716)

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

E-mail: lyang@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

在待加工材料前的空气中发生等离子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^[5]。因此,皮秒、飞秒脉冲激光器已经应用到相关精细加工领域。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,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。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。

本文设计了皮秒激光加工系统,该系统可用 355、532 及 1064 nm 三种波长的皮秒脉冲加工以满足不同材料的加工需要。同时设计了色差补偿系统,解决了大光谱范围内轴向色差较大的问题。

2 加工系统设计

2.1 加工系统原理

本文设计的皮秒加工系统主要由皮秒脉冲光源、光束传输系统、色差补偿系统、控制系统四部分组成。其中,皮秒脉冲光源可同时输出或分时输出三波长(1064、532、355 nm)皮秒脉冲。光束传输系统将三个波长的激光合束后,通过聚焦物镜聚焦在被加工件表面。对于同一个聚焦物镜,色差补偿系统可以实现 355~1064 nm 大光谱范围内的轴向色差补偿。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,若皮秒脉冲宽度小于 10 ps,则被加工材料直接汽化。被加工件固定在三维(3D)精密位移台上,随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。系统原理如图 1 所示。

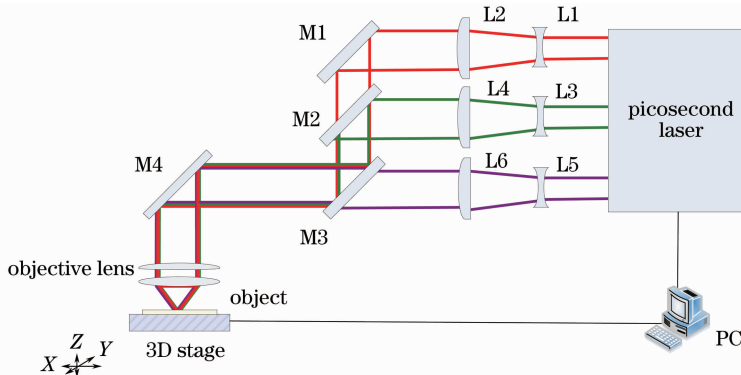


图 1 系统原理图

Fig.1 Principle schematic of system

皮秒激光器输出 1064、532 和 355 nm 三束激光。其中,1064 nm 的激光经球面镜 L1、L2 后被反射镜 M1 反射,透过 M2 经 M3 反射后,再经 M4 反射进入聚焦物镜聚焦到被加工件表面上。532 nm 激光经球面镜 L3、L4 后被 M2、M3、M4 反射进入聚焦物镜聚焦到被加工件表面上。355 nm 激光经球面镜 L5、L6 后,透过 M3,由 M4 反射进入聚焦物镜聚焦到被加工件表面上。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 和 355 nm 高反膜。L1~L6 为球面镜,其中 L1、L2 镀 1064 nm 增透膜,L3、L4 镀 532 nm 增透膜,L5、L6 镀 355 nm 增透膜。

2.2 皮秒激光器设计

皮秒激光器实验装置如图 2 所示,激光器由皮

秒种子源、再生放大器及功率放大器三部分组成。皮秒种子源采用 SESAM 被动锁模皮秒激光振荡器。该激光器为再生放大输出提供的功率为 200 mW;锁模脉冲经光隔离系统(OI)、模式匹配透镜 Lens1、45°1064 nm 高反镜 M1、M2 导入再生放大系统。1/2 波片 HWP1 和偏振片 TFP1 组成可调衰减片对种子功率进行衰减。由偏振片 TFP1、法拉第旋光器(FR)和 1/2 波片 HWP2 组成光隔离系统用于输出再生放大后的皮秒脉冲;再生放大器为对称 W 型 10 kHz 再生放大器,在注入抽运功率为 23 W 时,再生放大器输出平均功率为 3 W;再生放大后的皮秒脉冲经 45° 1064 nm 高反镜 M3 导入功率放大部分。功率放大采用三级端面抽运单程功率放大技术。其中增益介质均为 3 mm×3 mm×10 mm 的 Nd:YVO₄ 晶体,掺杂原子数分数为 0.3%。M4、M6、M8 为 45° 的二向色性反射镜,抽

运光入射面镀 808 nm 增透膜,另一面镀 1064 nm 高反膜和 808 nm 增透膜。M5、M7 为 45° 1064 nm 高反镜,用于折转光路。功率放大采用三级功率放大,放大后基频光功率为 15 W。抽运源均采用

LIMO 公司生产的功率 30 W,波长 808 nm 的半导体激光器,抽运光经聚焦耦合系统后,耦合到增益介质中,放大后的皮秒激光进入 1/2 波片 HWP3 和偏振片 TFP2、TFP3 组成的功率调节装置。

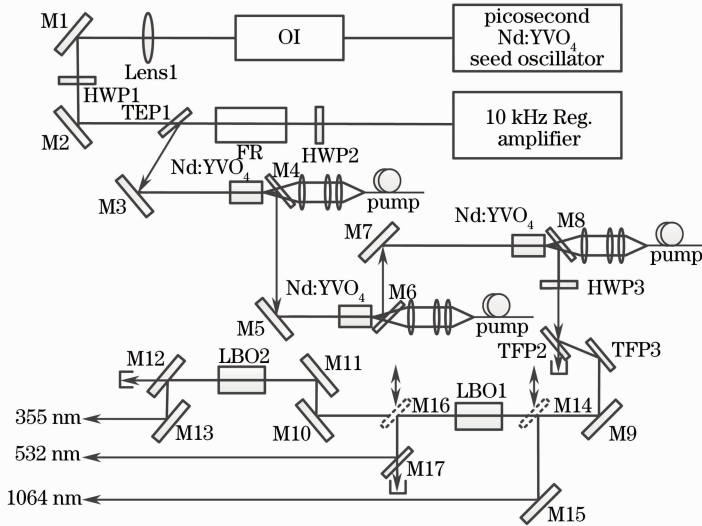


图 2 皮秒激光器结构图

Fig. 2 Structure of picosecond laser

非线性晶体选用具有高损伤阈值的 LBO 晶体,可以避免 KTP 晶体的灰迹效应。采用 I 类相位匹配的 LBO 晶体对放大后的激光进行腔外倍频,实现 10.58 W 的 532 nm 绿光输出,倍频转换效率为 70.5%;采用 II 类相位匹配的 LBO 晶体对倍频后的混合光进行和频,得到了 4 W 的 355 nm 紫外激光,1064 nm 基频光到 355 nm 紫外激光的光光转换效率为 26.7%。图 2 中 M9 为 45° 1064 nm 高反镜,将功率放大后激光导入频率转换部分。倍频晶体采用尺寸为 3 mm×3 mm×8 mm 的 I 类相位匹配的 LBO 晶体,为避免潮解使晶体工作在 50 ℃,切割角度为 $\theta=90.0^\circ, \phi=10.4^\circ$,晶体用铝箔包裹放在温控炉中。M10、M11 为镀有 1064 nm 和 532 nm 高反膜的 45° 折转镜,可将倍频后的 1064 nm 和 532 nm 激光导入和频晶体中。和频晶体采用尺寸为 4 mm×4 mm×20 mm 的 II 类相位匹配的 LBO 晶体,为避免潮解使晶体工作在 50 ℃,晶体切割角度为 $\theta=44.0^\circ, \phi=90.0^\circ$ 。和频晶体后的激光混有 1064,532 和 355 nm 三种不同波段。利用 45° 的二向色性镜 M12、M13 将 355 nm 紫外光进行分离,M12、M13 为石英玻璃镜,一面镀 1064,532 nm 增透膜和 355 nm 高反膜,另一面镀 1064 nm 和 532 nm 增透膜。为实现 1064 nm 和 532 nm 激光也能够独立输出,增加了镜 M14、M15、M16、M17,其中 M14、M15

为 45° 1064 nm 高反镜,M16 为镀有 1064 nm 和 532 nm 高反膜 45° 的折转镜,M17 为 45° 的二向色性镜,一面镀 532 nm 高反膜和 1064 nm 增透膜,另一面镀 1064 nm 增透膜,二向色性镜可以将倍频后的 1064 nm 和 532 nm 混合光进行分离输出 532 nm 绿光。镜 M14 和 M16 分别固定在电动平移台上,可以通过电动平移台移动 M14 和 M16 进行切光,实现 1064,532 和 355 nm 分别输出。利用自相关仪对 1064 nm 皮秒脉冲进行了脉宽测量,其测量曲线如图 3。皮秒脉宽为

$$T = 0.707 \times 2x \times t / (0.3s), \quad (1)$$

式中 t 为测量中的正脉冲半峰全宽(取 4.5 ms), x 为固定臂移动距离(取 4.3 mm), s 为相关曲线移动距离(取 10 ms)。由(1)式可得三级功率放大后

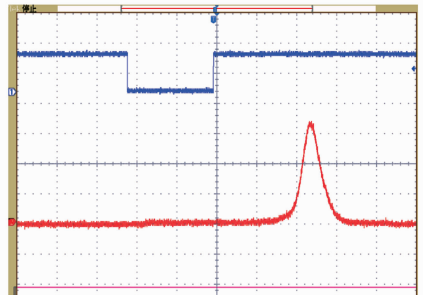


图 3 自相关曲线

Fig. 3 Autocorrelation curve

1064 nm 脉冲宽度 $T \approx 9.12$ ps。

2.3 轴向色差补偿设计

皮秒激光输出波长为 1064, 532 和 355 nm, 波长含盖光谱范围较宽, 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, 通过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 4 为焦点控制示意图。

位置移动到 f' 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可通过轴向色差补偿后, 聚焦光斑最小, 通常要求达到衍射极限。焦斑大小为

$$d = M^2 \times 2.44 \times \frac{\lambda \times f}{D}. \quad (2)$$

由(2)式可知, 在激光波长一定的情况下, 焦斑大小 d 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。激光发散角 0.1 mrad, 光斑尺寸 3 mm。对光学系统进行设计, 1064 nm 色差补偿镜组由两片球面镜组成, 曲率半径分别为 28.84, 7.19, 801.77 和 -62.38 mm; 厚度分别为 3 和 5 mm, 材料均为环保 K9 玻璃, 镜片间距离 78~80 mm 可调节。532 nm 色差补偿镜组由两片球面镜组成, 曲率半径分别为 29.41, 7.85, 191.22 和 -87.65 mm, 厚度分别为 3 和 5 mm, 材料均为环保 K9 玻璃, 镜片间距离 80~81.5 mm 可调节。355 nm 色差补偿镜组由两片球面镜组成, 曲率半径分别为 85.18, 8.98, -109.74 和 -36.44 mm, 厚度分别为 3 和 5 mm, 材料均为 CaF₂ 玻璃, 镜片间距离 80~82 mm 可调节。聚焦物镜由四片球面镜组成, 焦距 25 mm, 通光口径 12 mm, 设计结果如表 1 所示。色差补偿镜组最后一组片镜与聚焦物镜第一片镜的距离为 200 mm, 2~7 面实现了聚焦物镜配合色差补偿系统将激光光斑聚焦最小。8、9 面是聚焦物镜的工作距离, 为 19.6~20 mm。

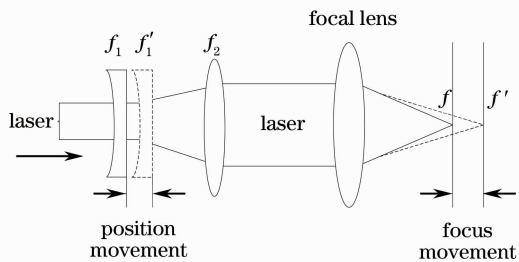


图 4 焦点控制示意图

Fig. 4 Schematic of focus control

透镜 f_1 和 f_2 组成了轴向色差补偿镜组, 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

表 1 聚焦物镜设计结果

Table 1 Design result of objective lens

	Surface type	Radius /mm	Thickness /mm	Glass
OBJ	Standard	Infinity	200	
1	Standard	76.789476	3	silica
2	Standard	-749.548675	17.908363	
3	Standard	37.422911	3	silica
4	Standard	93.267238	16.622258	
5	Standard	-85.249391	2	silica
6	Standard	257.485450	17.805004	
7	Standard	15.058983	3	silica
8	Standard	57.542229	19.6	
9	Standard	Infinity	0.4	

设计后, 轴向色差得到了补偿。补偿后的点列图如图 5。图 5(a) 为 355 nm 色差补偿后结果, 可以看出在工作距离 19.6 mm 处, 光斑大小接近于衍射极限, 在工作距 20.00 mm 处, 光斑大小完全在衍射极限范围内。图 5(b)~(c) 为 532 nm 和 1064 nm 色差补偿结果, 可以看出光斑大小均在衍射极限范围内。设计结果满足要求。

对所设计光学系统进行公差分析模板匹配后加工装校, 配合皮秒脉冲激光器, 进行了聚焦光斑大小测量实验, 测得工作距离为 19.6~20 mm, 激光波长为 355 nm 时聚焦光斑最小, 光斑大小为 3 μm, 测量结果如图 6 所示。经计算, 在 355 nm 皮秒脉冲聚焦 3 μm 光斑时, 峰值功率密度为 0.6×10^{15} W/cm²。

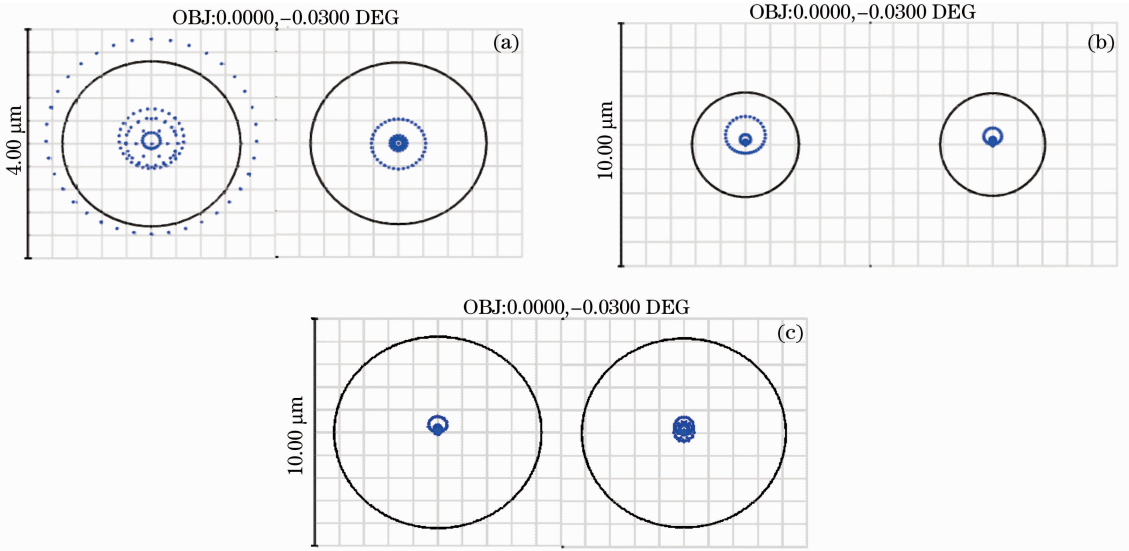


图 5 色差补偿后的点列图

Fig. 5 Spot diagram after aberration compensation

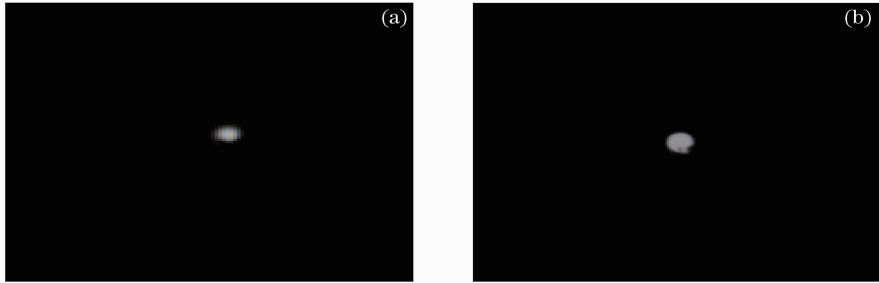


图 6 355 nm 聚焦光斑。工作距离分别为(a) 19.60 mm;(b) 20.00 mm

Fig. 6 355 nm focal spot with work distance of (a) 19.60 mm; (b) 20.00 mm

3 实验研究

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^[7]。采用三波长同轴输出皮秒激光精细加工系统对 200 μm 厚的铜电极板及 500 μm 厚的手机屏进行切割实验,实验结果如图 7 所示。考虑到铜对 355 nm 的吸收

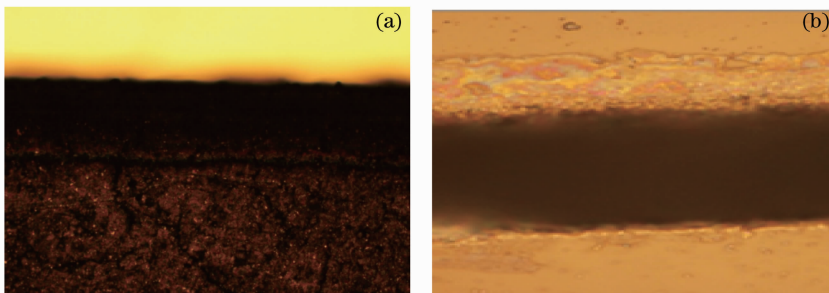


图 7 加工效果图。(a) 铜电极板;(b) 手机屏

Fig. 7 Machining effect diagram. (a) Copper electrode; (b) mobile phone screen

率最高且厚度为 200 μm ,因此选用 355 nm 皮秒激光为光源,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 7(a)。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,切割效果良好。手机屏由于厚度较厚,且材料为 Gorilla,主要成分为钠和钙,故采用 1064 nm 皮秒激光做光源,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 7(b)所示,从图中可看到切割线边缘平整无毛刺。

3.2 位置敏感阳极探测器图形加工

WSA 多阳极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 8 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 的电极厚度一般在微米级,而一般用于精密光刻的镀膜厚度则在纳米级,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

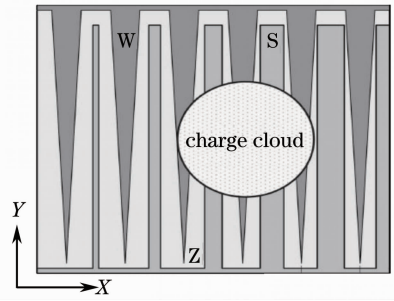


图 8 三电极的 WSA 几何简图

Fig. 8 Schematic diagram of three electrode geometry of WSA

电镀增厚”,即先在石英玻璃或是陶瓷基底上镀一缓层(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划 WSA 探测器图形,如图 9 所示。图 9 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,电阻膜为铬。从图中可看出,刻划线宽约 50 μm ,刻线边缘光滑平整。

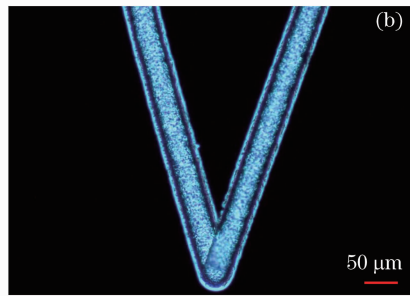
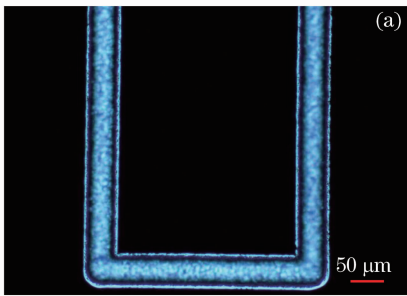


图 9 WSA 加工效果图。(a) S 极; (b) Z 极

Fig. 9 Machining effect diagram of WSA. (a) S electrode; (b) Z electrode

4 结 论

设计了皮秒激光加工系统,该系统可同时或分时输出 355,532 和 1064 nm 三种波长皮秒脉冲,单脉冲能量最大 1.5 mJ,激光脉冲宽度 9.12 ps。进行了轴向色差补偿设计,轴向焦点补偿最大距离 0.4 mm,最小焦斑直径为 3 μm ,最大峰值功率 $0.6 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$ 。应用该系统开展了铜电极板、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,实验研究表明皮秒激光加工系统可满足电子行业中的多种加工需求。

参 考 文 献

- 1 Ma Yunfeng, 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.
- 2 G Dumitru, V Romano, H P Weber. Femtosecond ablation of ultrahard materials[J]. Appl Phys A, 2002, 74(6): 729-739.

- 3 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.
- 4 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.
- 5 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.
- 6 F Dausinger, H Hügel, V Konov. Micromachining with ultrashort laser pulses; from basic understanding to technical applications[C]. *SPIE*, 2002, 5147: 106–115.
- 7 Liao Jianhong, Meng Hongyun, Wang Hongwei, *et al.*. Investigation and applications of fiber laser precision cutting system[J]. *Chinese J Lasers*, 2007, 34(1): 133–136.
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): 133–136.

栏目编辑: 宋梅梅