

文章编号: 0258-7025(2006)Supplement-0423-04

# 高功率紫外激光精密切割

阳建华, 陈继民, 左铁钊

(北京工业大学激光工程研究院, 北京 100022)

**摘要** 为了得到满足微电子工业应用的微细薄膜器件,以实验的方法分析和研究了影响紫外激光切割金属薄膜的切割质量的主要因素,介绍了针对金属薄膜柔性系数高、容易变形等特点而采取的特殊金属薄膜装夹方法。结果表明,在金属薄膜的紫外激光精密切割过程中,针对不同种类的金属薄膜选择合适的紫外激光输出功率及最佳切割速度有助于减少切缝宽度,获得较好的切缝质量;同时对金属薄膜选用合适的装夹方法,保证金属薄膜在精密切割过程中平整无变形,可有效地提高切割精度及微细薄膜器件加工的成功率。

**关键词** 激光技术; 激光加工; 精密切割; 工艺参量; 薄膜

**中图分类号** TN249; TG485 **文献标识码** A

## High Power Ultraviolet Laser Precision Cutting

YANG Jian-hua, CHEN Ji-min, ZUO Tie-chuan

(Research Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

**Abstract** In order to meet the demand of micro film apparatus in micro electronic industry, a series of experiments were carried out on the ultraviolet laser cutting thin metal film, and the effects of laser cutting parameters on the kerf width and quality were studied. Aiming at the high flexible coefficient and easy deformed etc. characteristics of thin metal film, a special clamp and cutting equipment was introduced. The results showed that during the process of the high power ultraviolet laser precise cutting, according to the kind and thickness of thin metal film, suitable ultraviolet laser power and cutting speed are selected to decrease the kerf width and good kerf quality is obtained; besides, suitable fixing method for the thin metal film is selected to ensure the thin film no distortion and improve the cutting precision and the success probability of the micro film apparatus machining effectively.

**Key words** laser technique; laser manufacture; precision cutting; technical parameter; thin film

## 1 引言

激光切割具有切缝窄,热影响区小,效率高,切边无机械应力,可适合多种不同材料的加工,而且可达到的孔直径以及特征尺寸的限制小等优点<sup>[1]</sup>。近年来,激光精密切割技术水平得到显著提高,并逐渐应用到半导体工业、微电子工业和微机电系统(MEMS)等领域,尤其是对金属薄膜的精密切割加工,这种切割方法因其独一无二的优点及其很高的性价比而得到了越来越广泛的关注。如精密光栅、金属薄膜温度传感器件、集成电路及芯片的制造过程中常使用的精细掩膜等微器件的研制,这些薄膜器件具有面积小、厚度尺寸小等特点,要求加工精度高、切割边缘光洁及加工后形变小,因此研制这些微细薄膜器件已不能采用传统的机械或电火花等加工方法。而且由于众多微细薄膜器件均要求材质为金

属性能较好的不锈钢、铝或铜,且切割加工最小尺寸要求在微米量级甚至亚微米级,热影响区小,这些条件决定了不能使用通常的CO<sub>2</sub>激光和Nd:YAG激光进行切割,这是因为红外激光聚焦光斑较大,在对不锈钢精密加工过程中产生的热影响区较大,材料烧蚀比较严重,而铝和铜对红外激光的反射率都很高,即使在高能量密度下,使用红外激光也难以对其进行切割加工;但可以选择使用处于波长为0.4 μm以下的紫外激光对其进行切割加工,这是因为一方面大多数材料对紫外激光反射率都较低,吸收率高,另一方面紫外激光波长较短,其聚焦点可以小到亚微米数量级,因此即使在不高的脉冲能量水平下,也可得到较高的能量密度,从而可有效对金属材料进行精密切割加工。

但目前利用紫外激光对金属薄膜进行精密切割

**基金项目:** 国家自然科学基金(50335050)和北京市教委基金(KM200510005013)资助课题。

**作者简介:** 阳建华(1978—),男,湖南衡阳人,北京工业大学激光工程研究院硕士研究生,主要从事激光微加工技术的研究。E-mail: yjh\_1@emails.bjut.edu.cn

加工方面的研究甚少,因此,本文尝试利用高功率三倍频固体紫外激光微加工装置,对金属薄膜材料进行了一系列精密切割加工实验,并对影响金属薄膜切缝切割质量的因素进行了初步的探索和研究,确定了针对不同厚度的金属薄膜的装夹方法,实现精细薄膜器件的快速、高质量加工。

## 2 实验装置及材料

实验装置如图 1 所示,本切割实验中采用的激光器为 Lambda Physik 公司的三倍频准连续固体紫外激光器,波长 355 nm,激光重复频率 1~15000 Hz,最大输出功率 10 W,激光模式为 TEM<sub>00</sub>。光束运动由振镜系统通过计算机软件进行控制,激光通过振镜系统传导、经  $f-\theta$  聚焦透镜聚焦在工作台面上,聚焦光斑直径约为 20  $\mu\text{m}$ 。激光切割在充满氩气的密封切割腔中进行,切割腔上设置有一透明石英玻璃窗口,底部设置一工作台面,金属薄膜即装夹在工作台面上。将需要切割的 CAD 格式图样输入振镜运动控制软件,即能控制激光光束对金属薄膜材料在切割腔内以直接刻写的方式进行精密切割加工。

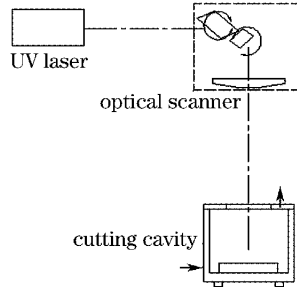


图 1 紫外激光切割实验装置

Fig. 1 Schematic graph of the ultraviolet laser cutting equipment

为了研究紫外激光对不同金属薄膜的切割性能,本实验中采用了不锈钢(1Cr18Ni9Ti)、纯铜(Cu)、7075 铝 3 类金属薄膜,薄膜厚度分别为 0.1 mm 及 0.3 mm。

## 3 实验结果及分析

激光精密切割质量主要以切缝的宽度来衡量,同时也以切缝的热影响区及切缝边缘的光洁度作为参考。通常影响激光切割质量的主要因素为激光功率、材料种类及厚度、切割速度,同时辅助气体压力和种类对切割过程也有一定的影响。在本实验中,切割过程在密封的切割腔内进行,采用静止标准气

压下的氩气作为保护气氛,因此暂不考虑保护气对切割过程产生的影响,而主要研究激光功率、切割速度及金属薄膜种类、厚度对切割质量的影响<sup>[2~4]</sup>。

实验结果表明,激光功率与切缝宽度大致呈线性关系,如图 2 所示,随着激光功率的逐步增大,切缝宽度明显减少,但是当激光功率增加到一定程度时,切缝宽度保持平稳。

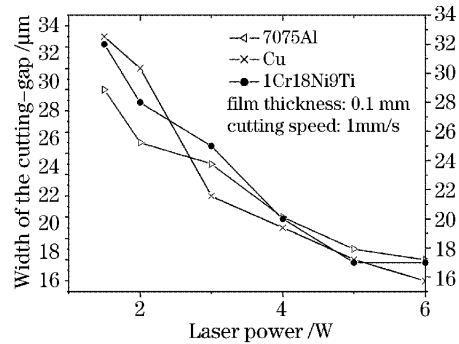


图 2 激光功率对切缝宽度的影响

Fig. 2 Effect of laser power on the kerf width

初步分析这是由于紫外激光切割金属薄膜过程不同于紫外激光对非金属材料的切割加工,高能量的紫外激光光子可直接破坏非金属材料表面的分子键,对非金属材料进行“冷”加工,而对金属薄膜的切割加工,切缝的形成完全依赖金属材料对紫外激光的高吸收率,材料受热熔化或直接气化形成切缝。在激光功率较低时,材料吸收激光能量主要以熔化为主,熔融的金属在表面张力的作用下形成切缝,因此,得到的切缝内熔渣较多,切缝两侧有明显的熔融金属堆积,切缝宽度也较宽;而在激光功率较高时,材料直接气化形成切缝,较小的激光聚焦光斑直径及较高的激光功率密度共同决定了所得切缝的宽度,因此切缝比较整齐,切缝两侧无明显的熔融金属堆积物。但是,在较大功率的激光切割过程中切缝宽度保持平稳的同时还发现随着激光功率的增大,切缝边缘的烧蚀现象趋于严重,热影响区也迅速扩大,从而使得切割效果变差。因此在激光的精密切割过程中要根据不同金属薄膜种类及其性质选择合适的激光功率。

激光的切割速度对切缝宽度有着显著的影响,如图 3 所示,在其他激光工艺参量一定的条件下,切割速度较低时,激光作用时间长,金属材料吸收的激光能量多,切缝宽度较宽,且切缝边缘出现较多熔渣及飞溅物。随着切割速度的提高,切缝宽度逐渐变窄,熔渣及切缝边缘的热影响区的减少趋势也很明

显。但是能得到较好切割质量的激光切割速度不是可以无限制地提高的,实验结果表明,随着激光切割速度的不断增加,当达到一定大小时,在金属薄膜表面得不到连续切缝或无法切透金属薄膜。如激光器输出功率为 6 W,对厚度 100  $\mu\text{m}$  的不锈钢薄膜进行切割时,能得到最小切缝宽的切割速度范围约为 4~5 mm/s,而当切割速度为 7 mm/s 时,切缝不连续或部分切割,当切割速度  $>7$  mm/s 时不锈钢薄膜表面无切割痕迹。这是因为当激光在金属薄膜表面移动速度过快时,在单位时间内吸收的激光能量不足以熔化、气化金属材料而形成切缝。因此,在一定加工条件下,不同金属薄膜具有最佳的激光切割速度范围,通过实验的方法找出不同金属薄膜的最佳切割速度范围对激光切割的精度提高具有重要的意义。

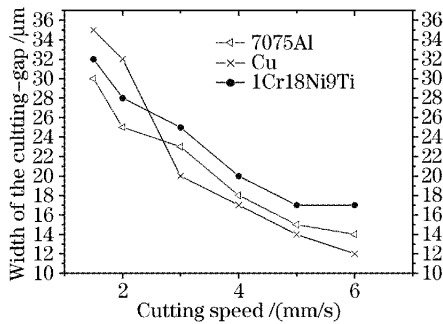


图3 切割速度对切缝宽度的影响

Fig. 3 Effect of cutting speed on the kerf width

由于不同金属材料对紫外激光的吸收有很大的差别,因此金属薄膜的种类及厚度也对切割质量产生很大的影响。一般来说,薄膜越厚,要得到连续切缝所要求的激光功率越高,其最佳切割速度范围值也越小<sup>[5,6]</sup>。例如在本实验中利用紫外激光对厚度为 0.1 mm 的铜薄膜切割,当激光功率为 5.0 W,切割速度为 4 mm/s 时即能得到连续整齐的切缝,而在厚度为 0.3 mm 的铜薄膜表面得到连续整齐的切缝需要的激光功率为 7.5 W(切割速度 3 mm/s)或切割速度为 0.5 mm/s(激光功率 5.0 W)。

铝和铜对红外及可见激光反射率较高,但是对紫外激光的反射率却比较低,不锈钢对紫外激光的吸收率也较高。但是不同金属材料的物理性质及其对激光加工性能的不同,即使在相同的加工条件下,其激光切割质量也会有很大差别。铝的熔点较低,因此在激光气化过程中所需要的激光能量较低,即使在较低的激光功率条件下,也能够切割较厚的薄

膜,且切割质量好,热影响区很小,无熔渣;而铜在紫外激光的切割过程中,在切割位置会产生明显的等离子体现象,所产生的铜蒸气一定程度上阻止了铜薄膜对激光的吸收,因此,与其他两种金属薄膜材料相比,切割过程所要求的激光功率较高;不锈钢合金中由于 Ni 的含量较大,切缝边缘在激光的作用下产生的熔化物粘度大,流动性差,因而切缝内熔渣较多。在相同的实验条件下,分别对厚度为 0.3 mm 的铜、铝及不锈钢薄膜进行紫外激光切割实验,对比其切缝端面轮廓特征(如图 4),在显微镜下可以明显观察到铝薄膜的切缝质量最好,切缝宽度最小,切缝深度也最深,铜薄膜的深度最浅,切缝宽度最宽,不锈钢的切缝内熔渣较多,热影响区最宽。

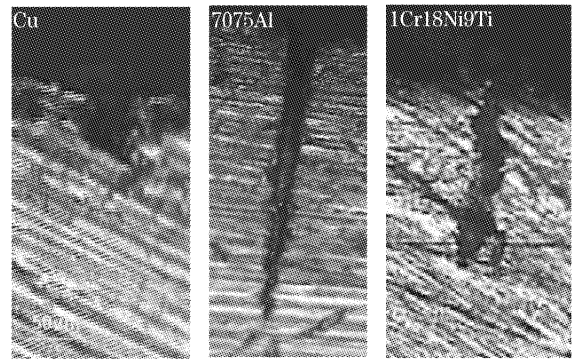


图4 三种金属薄膜的切缝端面形状。薄膜厚:0.3 mm,切割速度 1 mm/s,激光功率 2 W

Fig. 4 Cross-sections of slots cut in 3 kinds metal thin films using ultraviolet laser-cutting. Thin film thickness: 0.3 mm, cutting speed: 1 mm/s, laser power: 2 W

#### 4 金属薄膜的装夹

由于金属薄膜厚度尺寸非常小,延展性能好,容易弯曲变形,因此,在激光精密切割过程中,微小的气流扰动及气压的变化也可能使薄膜产生卷曲,定位置产生偏移,导致切割失败。所以如何平整地装夹金属薄膜,对提高薄膜器件的激光切割精度具有很大影响。

在本实验中金属薄膜精密切割过程不采用辅助气流,切割过程在一充满氩气的密封切割腔内进行,金属薄膜切缝的形成主要依赖薄膜材料对激光的吸收,切割过程主要以材料气化方式进行。

对于较厚的金属薄膜激光切割加工,可直接将平整的金属薄膜通过机械装夹的方法将其边沿压紧在光滑的加工台面上。而对于厚度在 0.1 mm 以下的金属薄膜,由于柔性系数很高,微小的受力即产生

变形,通过机械的装夹办法难以保证薄膜表面平整。在简单、快速的激光切割过程中,我们利用酒精或其他溶液的液体粘滞力,将金属薄膜平整地粘贴在工作台表面,即可以达到平整装夹金属薄膜的目的,基本满足激光精密切割要求,如图5所示的微细薄膜传感器部件就是利用这种装夹方法加工出来的。

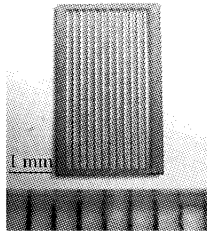


图5 微细薄膜传感器部件。Cu,薄膜厚0.05 mm,激光功率3.0 W,切割速度:3 mm/s

Fig. 5 Micro Cu-film sensor part. Thin copper film thickness: 0.05 mm, laser power: 3.0 W, cutting speed: 3 mm/s

而对于复杂薄膜器件的激光切割,由于切割时间较长,溶液受热逐渐蒸发失去粘滞的作用,这种装夹薄膜的方法已经不能适用。我们设计了一种特殊的玻璃夹具,实现了装夹、切割金属薄膜的目的,其

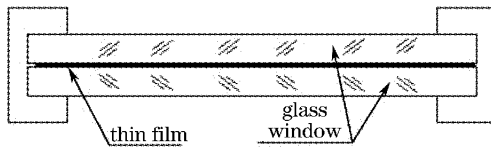


图6 金属薄膜紫外激光切割玻璃夹具结构示意图  
Fig. 6 Schematic graph of the glass clamp used in the ultraviolet laser-cutting thin metal film

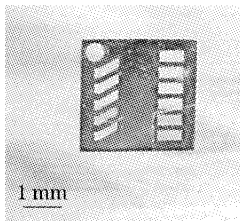


图7 微细掩模。1Cr18Ni9Ti,薄膜厚:0.1mm,激光功率:2.0 W,切割速度:1.0 mm/s

Fig. 7 Micro-mask. Thin stainless steel film thickness: 0.1 mm, laser power: 2.0 W, cutting speed: 1.0 mm/s

结构示意图如图6,金属薄膜被上下两块对紫外激光透光性能好的玻璃夹平,激光透过玻璃照射在金属薄膜上,以类似“刻蚀”的方法去除金属材料,形成切缝。使用该切割夹具对金属薄膜进行紫外激光切割,即使不用激光切割腔,也能实现金属薄膜的精密切割,且切割质量好,切割成功率高。图7所示的微细掩模就是利用这种装夹方法制作成功的。

## 5 结 论

1) 选择合适的紫外激光输出功率及最佳切割速度有助于减少切缝宽度,提高切割精度;

2) 薄膜材料的种类和厚度对切割质量也有较大的影响,在精密切割过程中,要根据不同种类薄膜材料选择合适的激光加工工艺参量;

3) 在紫外激光的精密切割过程中,可利用溶液或玻璃夹具有效地对柔性系数较高的金属薄膜进行装夹,提高切割加工精度;

4) 铜薄膜紫外激光切割过程中产生的等离子体现象对精密切割的影响有必要进一步深入研究。

## 参 考 文 献

- 1 Li Xiangyou, Zeng Xiaoyan, Huang Weiling. Status and prospect of precision laser machining [J]. *Lasers Journal*, 2000, 21(5): 1~3  
李祥友,曾晓雁,黄维玲. 激光精密加工技术的现状和展望 [J]. 激光杂志, 2000, 21(5): 1~3
- 2 Li Xiangyou, Zeng Xiaoyan, Liu Yong *et al.*. Study of YAG laser cutting process with stainless steel sheet [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, A28(12): 1125~1129  
李祥友,曾晓雁,刘勇等. 激光精密切割不锈钢薄板的工艺研究 [J]. 中国激光, 2001, A28(12): 1125~1129
- 3 Liu Shijie, Lei Huadong, Yu Yang. Laser cutting technology of large size shim [J]. *J. New Technology and New Technics · Heat Process Technology*, 2003, (8): 29~31  
刘世杰,雷华东,余洋. 大尺寸薄垫片的激光切割技术 [J]. 新技术与新工艺·热加工技术, 2003, (8): 29~31
- 4 Zhang Yi, Long Hui, Li Lijun. Test study on improving precision of laser cutting [J]. *J. Hunan University (Natural Sciences Edition)*, 2001, 28(3): 37~40  
张屹,龙辉,李力钧. 提高激光切割精度的试验研究 [J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2001, 28(3): 37~40
- 5 Kai-Uwe Preiflig, Dirk Petring, Gerd Herziger. High speed laser cutting of thin metal sheets [C]. *SPIE*, 1994, 2207: 96~109
- 6 Phillip J. McMahon, Richard F. Muscat, Peter Vincent *et al.*. Characterization of laser micromachining of metals [C]. *SPIE*, 2005, 5650: 209~218