

紫外激光器及其在激光加工中的应用

Ultraviolet Laser and Its Application in Laser Processing

唐娟 廖健宏 蒙红云 张庆茂 周永恒 刘颂豪

(华南师范大学 光子信息技术广东省高等学校重点实验室, 广州 510006)

TANG Juan LIAO Jianhong MENG Hongyun ZHANG Qingmao ZHOU Yongheng LIU Songhao

(Key Laboratory of Photonic Information Technology, South China Normal University, Guangzhou 510631)

摘要 紫外激光的波长短, 能量聚集集中, 分辨率高, 特别是具有“冷加工”的特性, 能直接破坏连接物质的化学键, 而不产生对外围的加热, 因此成为加工脆弱物质的理想工具, 并能对多种材料进行打孔、切割、烧蚀, 在微加工领域中具有广泛的应用。简要介绍了几种紫外激光器的原理特点及其发展现状, 并讨论了它在激光加工中的应用。

关键词 紫外激光器; 激光加工; 微加工

Abstract The advantages of ultraviolet (UV) laser include short wavelength, concentrated energy, high resolution, especially its "cold processing" properties. The UV laser can destroy the chemical bond of matter directly but not give rise to external heating, and become an ideal tool for processing fragile material. It is able to carry out drilling, cutting and ablating on various materials, and it has a wide application in the field of micro-machining. The fundamental principle, main characteristics and development of several UV lasers are introduced, and the application of UV laser in laser processing are also analyzed.

Key words ultraviolet laser; laser processing; micro-machining

中图分类号 TN248

1 引言

自 20 世纪激光问世不久, 激光加工技术就受到人们的重视, 经过 40 多年的发展, 至今已成为先进制造技术的重要组成部分^[1]。基于激光束具有单色性好、能量密度高、空间控制性和时间控制性良好等一系列优点, 目前它已广泛应用于材料加工等领域^[2]。其中紫外激光的波长短、能量集中、分辨率高, 因此在去除焊料外壳、

在电子线路板上钻微孔、在薄膜或薄片材料中制作微通道、进行精密切割和对接等微加工领域具有广泛的应用^[3]。红外或可见光通常靠产生集中局部的加热使物质熔化或气化的方式来进行加工, 但这种加热会导致周围区域严重破坏, 因而限制了边缘强度和产生小精细特征的能力, 而紫外激光是通过直接破坏连接物质原子组分的化学键, 这种将物质分离

成原子的过程是一个“冷”过程, 不产生对外围加热。该特性使紫外激光器成为加工薄橡胶和塑料制品类脆弱物质的理想工具^[3], 不仅如此, 大多数材料都能有效吸收紫外光, 从而可被用来加工红外光和可见光激光器加工不了的材料。

近年来, 紫外激光器的应用是工业激光市场增长最快的一部分, 紫外激光器尤其是准分子激光器

和固体紫外激光器成为一个新的研究热点。本文在简要介绍两种主要紫外激光器的原理和近几年的研究进展的基础上,重点介绍了紫外激光器在激光加工中的应用。

2 紫外激光器

2.1 气体紫外激光器

气体紫外激光器有准分子激光器、氙离子激光器、氮分子激光器、氟分子激光器、氦镭激光器等。用于激光加工的气体紫外激光器主要有准分子激光器等。

2.1.1 准分子激光器

准分子是一类在激发态时复合成分子,在基态时离解为原子的不稳定缔合物。在准分子激光系统中,跃迁发生在束缚的激发到排斥的基态,因此属于束缚-自由跃迁^[4]。准分子激光器是一种脉冲激光器,工作介质一般是一定比例混合的惰性气体和强受电子卤族元素气体,当基态的惰性气体原子被激发时,核外电子被激发到更高的轨道从而改变了电子壳层全部填满的状态,使之和其它原子形成准分子,当激发态的分子跃迁回基态时,立即分解,还原成本来的特性,同时释放出光子,经谐振腔放大后,发射出高能量的紫外激光。准分子激光器最早出现于1971年,自1972年以来得到了迅速的发展。早期的准分子激光器以液态氙为工作物质。当前对准分子激光器的研究主要集中在提高其重复频率和平均功率。以俄罗斯联邦卓茨克创新与核聚变研究所的V. Borisov为代表,他们研制的XeCl准分子激光器的平均输出功率已从1982年的130 W(0.26 J, 500 Hz)提高到了1998年的1 kW(20 J, 100 Hz),日本日立公司研制的

XeCl准分子激光器成功最高运转频率为5 kHz、最高平均输出功率为500 W,在5 kHz的重复运转频率下,平均输出功率达到了560 W;在法国,当前研制的高功率XeCl激光器在400 Hz重复运转频率下的平均输出功率已经超过了1 kW^[5]。

2.1.2 氙离子激光器

氙离子激光器是惰性气体离子激光器的典型代表,是利用气体放电使管内氙原子电离并激发,在离子激发态能级间实现粒子数反转而产生激光的。它的能量转换效率较低,最高仅0.6%,一般只有 10^{-4} 量级,频率稳定度约为 3×10^{-11} ,使用寿命超过1000 h。氙离子激光器有水冷和风冷两大类,新一代氙离子激光器正向智能化(自诊断、光控、遥控、面板程序存储等)方向发展^[6]。

2.2 固体紫外激光器

一般产生紫外激光谱线的方法有两种:一是直接采用红外全固体激光器的三倍频或四倍频取得355 nm或266 nm等紫外激光谱线,另一种方法是先用倍频技术得到二次谐波,再利用和频技术得到紫外激光谱线。前一种方法有效非线性系数小,转换效率低,后一种方法由于利用的是二次非线性极化率,转换效率要比前一种高许多^[7]。偏硼酸钡晶体BBO、三硼酸锂晶体LBO、铯-锂-硼酸盐单晶和CsB₃O₅(CBO)晶体是常用于紫外波段频率转换的非线性晶体。为了提高和频光的输出功率,应尽量选择有效非线性系数大的晶体,并根据高斯光束的传输和腔外频率变换原理,尽量提高基频光束的注入功率和增长和频晶体的长度,此外更主要的是必须满足相位匹配条件,即

$\Delta k_2=0$ 时, $\frac{\sin^2(\Delta k_2 L_2/2)}{(\Delta k_2 L_2/2)^2} = 1$ 。因此

在设计激光器时,应尽可能地使激光束聚焦到非线性晶体的接受角度范围之内,尽可能地降低位相失配的影响,这就要求聚焦不能太紧。但这又影响了基频光的功率密度,进而影响和频光的转换效率。在实际操作中,必须权衡这两方面的因素使和频光的输出功率达到最高^[7]。美国光谱物理公司用端面抽运Nd:YVO₄激光获得12 W, 30 kHz的355 nm激光。日本三菱公司在全固态紫外Nd:YAG激光器领域取得了巨大的进展,分别获得了18 W的355 nm和20.5 W的266 nm紫外输出,其中355 nm激光的重复频率为25 kHz;266 nm激光的绿光注入功率为105.8 W、转换效率为19.4%,没有出现饱和及光损伤现象,若提高绿光注入将会得到更高的紫外输出^[8]。到目前为止国内频率转换获效果最好的是山东师范大学的何京良^[9]等人利用激光二极管(LD)抽运Nd:YVO₄晶体获得的355 nm和266 nm的紫外激光,他们采用腔内声光调Q技术产生1064 nm准连续波输出,腔外用KTP晶体倍频产生532 nm的激光输出,用不同的BBO晶体进行三倍频、四倍频,三倍频得到最高平均功率为310 mW的355 nm紫外输出,转换效率为14.1%,稳定度优于1%;266 nm的平均功率高达196 mW,转换效率达10.1%。固体紫外激光器相对准分子激光器来说具有紧凑的体积、易维护、易操作等优点^[9]。

3 紫外激光器在激光加工中的应用

紫外激光器在激光加工方面有三个优势:一是紫外激光器的

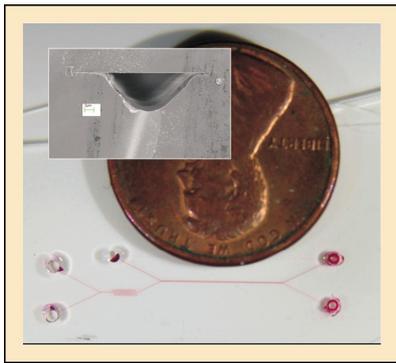


图 1 微流控芯片

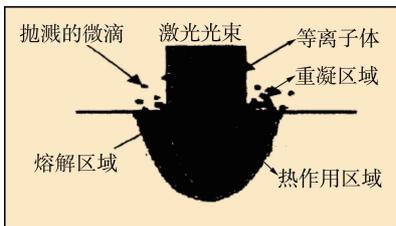


图 2 激光与材料作用的示意图

波长较短能加工很小的部件；二是紫外激光器进行激光加工时直接破坏材料的化学键，是“冷”处理过程，具有很小的热影响区；三是大多数材料能有效地吸收紫外光，可以加工许多红外和可见光激光器加工不了的材料，而且紫外激光器尤其是固体紫外激光器的结构越来越紧凑、平均功率高、易维护、操作简便、成本低、生产率高。因此它在生物工程、材料制备、全光光学器件制作、集成电路板及半导体工业等激光加工领域获得了广泛的应用。

3.1 紫外激光在生物工程上的应用

从 1997 年 Hubert Girault 研究组首次研究以准分子激光制作聚合物微流控芯片以来，激光制作微流控芯片就成了一个研究热点。微流控芯片在分析、合成及细胞培养、DNA 测序、基因突变等领域得到了广泛的应用，它基于微米级管道网络的流体控制技术，通过电渗、机械泵等为驱动，实现

流体的输运，再结合功能化的单元，使流体中的组分在流动过程中分配、分离，最后通过检测器进行检测^[10]。紫外激光加工是“冷加工”，紫外激光制作微流控芯片过程中直接切断分子中的化学键，材料发生分解而被去除。激光直接写入制作微流控芯片过程中无需掩模。整个制作过程灵活、快速，不需要绝对无尘室设备和高腐蚀性化学剂^[11]。由于大多数材料都能有效地吸收紫外光，因此许多材料都可以被紫外激光用来制作微流控芯片，如玻璃、石英、高分子聚合物和生物可降解的聚合材料等。

3.2 材料制备

近年来，利用激光烧蚀技术获得纳米材料取得了很大的进展。激光烧蚀法^[12]是用一束高能激光辐射靶材表面，使其表面迅速加热融化蒸发，随后冷却结晶生长的方法。利用紫外激光进行烧蚀有三大优势：一是制备周期短；二是紫外激光能被多种材料吸收，如陶瓷、金属、聚合物等；三是具有非常小的热影响区，减少了制备材料中的熔融小颗粒和靶材碎片^[13]。这些在激光引起的爆炸过程中喷溅出来的熔融小颗粒和靶材碎片，大大降低了制备的材料质量。激光烧蚀法的工作原理是将激光束经透镜聚焦后，在焦点附近产生足以融化所有材料的高温，此时激光主要是作为局部能源，当激光照射到靶材表面时，部分入射光被吸收，只要表面吸收的激光能量超过蒸发温度，靶材就会融化蒸发出大量原子、电子和离子，从而在靶材表面形成一个等离子体。当激光移走后，等离子体会先膨胀再迅速冷却，其中的原子就在靶对面的收集器

上凝结起来，这样就能获得所需的纳米薄膜和纳米材料，如图 3^[14]。

3.3 制作全光光学器件

传统的制作衍射光栅的方法是用金刚石刻刀刻划，在刻划的过程中刀具的磨损非常严重，特级刀料金刚石刻刀也只能刻划几块光栅。利用激光烧蚀制备衍射光栅只需将由计算机控制的激光束在材料表面扫描出光栅的条纹结构，扫描区的薄膜被烧蚀掉，衬底裸露出来，在材料表面就形成了光栅结构。制作过程中改变激光扫描速度和激光输出功率，或改变光栅的周期就能改变光栅的衍射效率。操作简单方便、快速。图 4 中灰色的区域是薄膜被烧蚀后裸露出来的衬底，黑色的部分是未被烧蚀的区域^[15]。

3.4 紫外激光在集成电路板上的应用

紫外激光器在电路板上的应用主要是在聚合物和铜的层布式电路板上钻细孔、切割柔性电路、

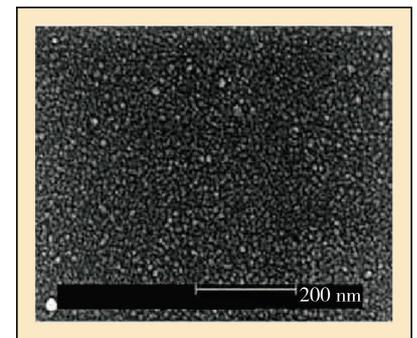


图 3 纳米 Si 薄膜

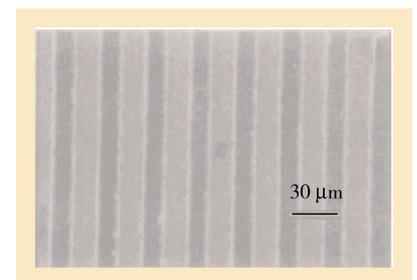


图 4 衍射光栅结构

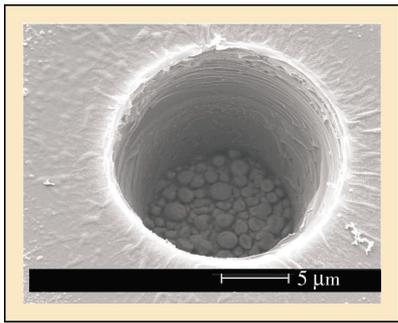


图 5 紫外激光器在铜上打的 18 μm 的孔

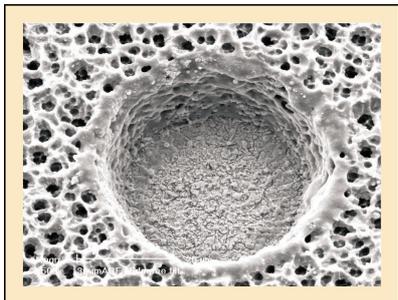


图 6 环氧材料上打的 50 μm 的孔

制作检测修复集成电路板。比较传统的钻孔方式是利用 CO₂ 激光器和紫外激光器打孔,但是 CO₂ 激光器主要打 75~150 μm 的孔,且小孔易错位,而紫外激光器可以打 25 μm 以下的孔,精度高且不会错位^[16]。同时 CO₂ 激光不能穿透一些高反射率的表面,如铜,而紫外激光就能在多种材料上打孔、切割和焊接。

一些高密度印刷线路板上的小孔多达 10000 个,这些小孔的精度决定了装置的最终性能和成本的高低。紫外激光器聚焦好、脉冲稳定、重复频率高,可以在多种材料上打精度非常高的一些微细孔。紫外激光还能在一些含填料的高聚物上打孔,如图 6^[16]所示。激光加工 PI 膜很简单,但是加工用于粘结膜与铜箔的粘结剂非常困难。如丙烯酸粘结剂对热非常敏感,很难彻底去除而不留任何

的残余物,利用紫外激光就可以很好的对它进行加工。从图 7,8 可以看到^[16],粘结剂被彻底除去,被烧蚀区域不留任何残余物。

此外紫外激光器还可应用于集成电路的制作、检测和修补。日本富士通研究所研制了一台高分辨力的紫外激光扫描装置,利用激光的直写技术,可以直接在印刷线路板上绘制复杂、精细的电路图。多层电路板传统的故障修复方法是采用微钻头钻孔,但是当错误出在夹层里时,由于精确定位困难,会使废品率提高。采用激光为工具,则可以先用小能量、低重复率脉冲进行精确定位,然后在最佳工作条件下高效工作,减小出错的几率^[17]。如美国机器公司 S.E 休斯等^[18]人利用脉冲激光在集成电路上形成电连接方法,对有缺陷的集成电路块进行了成功修补,此外还可将集成电路上的铝布线通导中断开的地方重新连接起来。

3.5 紫外激光在半导体产业中的应用

半导体工业中的半导体薄片加工技术不断发展,为了提高生产效率,半导体产品使用半导体薄片加工技术把几个到几千万个半导体仪器集成到一块称为“晶片”的高纯度衬底上,一块几英寸的晶片上要集成的芯片数目达到几千片,在封装前要把它们分割成单个电路单元^[19]。随着微电子器件的发展,晶片也越来越薄,薄晶片的切割便成为了亟待解决的问题。传统的晶片切割是采用金刚石锯进行机械切割,它的缺点就是晶片不能太薄,有些晶片的材料很脆,切割时很容易破裂,也很容易损害周围的元件,而且切割时金刚石锯片也容易受损。采

用紫外激光切割薄片就可以很容易的解决这些问题,紫外激光切割具有切缝窄、热影响区小、效率高、切边无机械应力的加工特点,可加工多种不同薄膜材料。

4 展望

紫外激光器的发展非常迅速,国内外公司不断推出更高功率和更高重复频率的产品,它的实际应用范围也越来越广泛,在医疗和食品器械制造和应用方面也具有很大的优越性。在先进加工工业中采用紫外激光器,对提高工业加工水平具有重要的意义,我国在紫外激光器及其应用上与国际先进水平还有较大的差距,从长远来看,紫外激光器在我国必将得到更广泛的应用,具有非常广阔的市场。

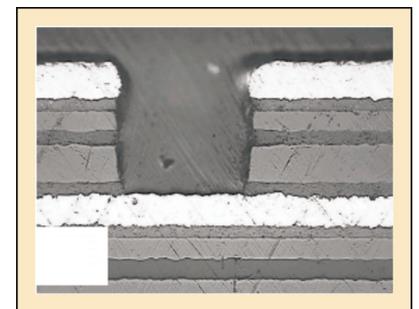


图 7 多层 PI 膜/环氧树脂粘结剂上打的 100 μm 盲孔的剖切图

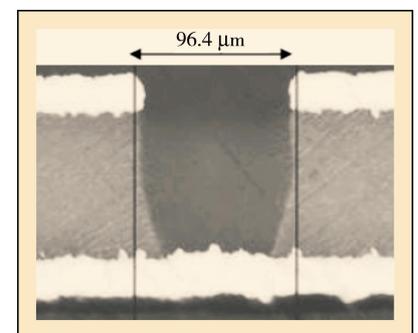


图 8 多层 PI 膜/丙烯酸树脂粘结剂上打的 100 μm 盲孔的剖切图

收稿日期:2007-01-09

作者简介:唐娟(1982-),女,湖南邵阳人,华南师范大学硕士研究生,主

要从事激光应用方面的研究。

E-mail:tangjuansxy@yahoo.com.cn

导师简介:廖健宏(1965-),男,湖南

邵阳人,华南师范大学副研究员,主要从事激光加工技术方面的研究。

E-mail:liaojh@scnu.edu.cn

参考文献

- 1 宋威廉.激光加工技术的发展[J]. 激光与红外, 2006, 36(supplement):755~758
- 2 王又良.激光加工的最新应用领域[J]. 应用激光, 2005, 25(5):329~332
- 3 李林,李正佳,何艳艳.全固态紫外激光器研究进展[J]. 激光杂志, 2005, 26(6):1~3
- 4 刘颂豪,李淳飞著.光子学技术与应用[M]. 广州:广东科技出版社, 安徽科技出版社, 2006:336
- 5 高怀林,杨艳霞.工业应用放电泵浦准分子激光器研究进展[J]. 激光杂志, 2004, 25(4):1~3
- 6 李适民,黄维玲著.激光器件原理与设计[M]. 北京:国防工业出版社, 2005:48
- 7 高兰兰,檀慧明.LD 端面抽运全固态紫外激光器[J]. 光电子技术, 2003, 23(2):109~112
- 8 周睿. 大功率、高亮度全固态绿光激光器及紫外激光器研究[D]. 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 2004
- 9 Jun Sakuma, Kyoich Deki, Andrew Finch et al. All-solid-state, high-power, deep-UV laser system based on cascaded sum-frequency mixing in CsLiB₆O₁₀ crystals[J]. *Optical Society of America*, 2000, 39(30):5505~5511
- 10 冯波,程正学,陈华等.Q33 微流控芯片制作中的激光技术[J]. 激光杂志, 2006, 27(2):11~13
- 11 JiYen Cheng, MengHua Yen, ChengWey Wei et al.. Crack-free direct-writing on glass using a low-power UV laser in the manufacture of a microfluidic chip[J]. *J. Micromechanics and Microengineering*, 2005, 15:1147~1156
- 12 吴旭峰,凌一鸣.激光烧蚀法制备一维纳米材料[J]. 激光技术, 2005, 29(6):575~578
- 13 Andreas Ostendorf, Christian Kijlik, Thorsten Temme et al.. The influence of physical characteristics on ablation effects in UV laser assisted micro engineering[J]. *Proc. SPIE*, 2004, 5662:638~643
- 14 王英龙,卢丽芳,闫常瑜等.具有窄光致发光谱的纳米 Si 晶薄膜的激光烧蚀制备[J]. 物理学报, 2005, 54(12):5738~5741
- 15 胡晓,赵全忠,姜雄伟等.飞秒激光烧蚀玻璃基质金属薄膜直写衍射光栅[J]. 中国激光, 2006, 33(1):17~20
- 16 Weisheng LEI, John Davignon. Solid state UV laser technology for electronic packaging applications[J]. *Proc. SPIE*, 2005, 5629:314~326
- 17 凌磊,楼祺洪,叶震寰等.紫外激光刻蚀多层线路板初步研究[J]. 中国激光, 2003, 30(10):953~955
- 18 张林华,杨永强,米克嫫.激光技术在大规模集成电路中的应用及展望[J]. 激光与光电子学进展, 2005, 42(6):48~55
- 19 张国顺著.现代激光制造技术[M]. 北京:化学工业出版社.2006:321

《激光技术及其应用》汇编介绍

为了更好地服务科研工作者、工程技术人员以及其他激光行业的从业人员,总结研究开发经验,中国科学院上海光学精密机械研究所光学期刊联合编辑部从近年来《中国激光》和《光学学报》上发表的论文中精选了激光实验技术与应用方向的优秀论文,续集出版。

论文集共收录论文 39 篇,主要反映了激光器技术,传感器技术,微细加工技术,光学测量与计量等方面的研究进展。感兴趣的读者请与本刊发行部的高先生联系。电话:021-69918253,Email:gfhai@siom.ac.cn。

《中国激光》编辑部