

紫外激光器应用进展

苏 畅, 马宇航, 丁可可, 韦 龙, 李再金*, 赵志斌, 曾丽娜, 李 林, 乔忠良, 陈 浩, 曲 轶
海南师范大学物理与电子工程学院, 海南省激光技术与光电功能材料重点实验室, 海南 海口
Email: *lizaijin@126.com

收稿日期: 2020年12月8日; 录用日期: 2021年3月5日; 发布日期: 2021年3月12日

摘 要

紫外激光是一种能量比较集中、波长较短、分辨率高, 可以被广泛材料充分且有效吸收的激光。它具有不接触物体就可改造物体表面生物、化学和物理性质的特性, 最突出的特点是“冷”加工, 及较少的产生热, 减少热能对材料的损伤, 所以特别适用于加工微小脆性的材料。本文简要介绍了紫外激光器的发展, 并对常用于激光加工的准分子气体激光器和全固态紫外激光器的原理和技术进行了概述。重点介绍了紫外激光器的应用。在医用生物材料方面: 紫外激光对生物材料照射, 改其表面的生物、化学特性, 但不破坏和改变材料整体性质, 如增强生物材料与人体组织的相容性。在刑侦方面, 通过紫外激光器可以更加便捷地找到犯罪嫌疑人在现场留下的痕迹。在集成电路板上的应用方面, 紫外激光器可以在柔性电路、聚合物和铜的层布式电路还有一些微小的电路材料上进行精确的打孔、打标、切割。在微光学器件和半导体产业中的应用方面, 紫外激光器可以对易碎、容易破损、易产生裂纹的微小光学器件和半导体材料进行高效和高质量的加工和研究。

关键词

紫外激光器, 微加工, 半导体材料, 微光学器件, 集成电路

Application Progress of Ultraviolet Laser

Chang Su, Yuhang Ma, Keke Ding, Long Wei, Zaijin Li*, Zhibin Zhao, Lina Zeng, Lin Li, Zhongliang Qiao, Hao Chen, Yi Qu

Hainan Key Laboratory of Laser Technology and Optoelectronic Functional Materials, School of Physics and Electronic Engineering of Hainan Normal University, Haikou Hainan
Email: *lizaijin@126.com

Received: Dec. 8th, 2020; accepted: Mar. 5th, 2021; published: Mar. 12th, 2021

Abstract

Ultraviolet laser is a kind of laser with concentrated energy, short wavelength and high resolution,

*通讯作者。

文章引用: 苏畅, 马宇航, 丁可可, 韦龙, 李再金, 赵志斌, 曾丽娜, 李林, 乔忠良, 陈浩, 曲轶. 紫外激光器应用进展[J]. 光电子, 2021, 11(1): 26-34. DOI: 10.12677/oe.2021.111004

which can be fully and effectively absorbed by a wide range of materials. It has the characteristics that it can transform the biological, chemical and physical properties of the object surface without touching the object. The most prominent feature is “cold” processing, and less heat generation, which can reduce the damage of heat energy to materials, so it is especially suitable for processing micro-brittle materials. In this paper, the development of ultraviolet laser is briefly introduced, and the principle and technology of excimer gas laser and all solid state ultraviolet laser commonly used in laser processing are summarized. The application of UV laser is mainly introduced. In the aspect of medical biomaterials, ultraviolet laser irradiation can improve the biological and chemical properties of biomaterials surface, but not destroy and change the overall properties of biomaterials, such as enhancing the compatibility between biomaterials and human tissues. In the area of criminal investigation, ultraviolet laser can be more convenient to find the traces left by suspects. In the application of integrated circuit board, UV laser can accurately punch, mark and cut on flexible circuit, polymer and copper layer circuit, and some microcircuit materials. In the application of micro-optical devices and semiconductor industry, UV laser can be used to process and research micro-optical devices and semiconductor materials with high efficiency and high quality.

Keywords

Ultraviolet Laser, Micro Fabrication, Semiconductor Materials, Micro-Optical Devices, Integrated Circuit

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着科技的快速发展,电子、医学治疗、生物还有材料等方面都需要更为轻便、高效、小型化、多功能、高品质的激光仪器设备。目前常见的激光器的波长为红外和可见光,传统的激光工具、工艺和技术存在效率低、操作复杂、成本高、范围受限、损耗严重、精确度低等问题。近几十年来紫外激光器被科学家们反复研究突破,是因为其具有相对高的相干性,更加便捷、稳定可靠、成本低、可调谐、小型、效率高、精度高还有实用化等特点。

2. 紫外激光器

紫外激光器主要分为气体紫外激光器和固体紫外固体激光器。工作介质在泵浦源的作用下通过吸收外界的能量达到激发态,经过粒子数反转增益大于损耗,对光进行放大,部分被放大的光反馈继续激励从而在谐振腔内产生振荡产生激光。气体介质主要是利用脉冲或者电子束放电,通过电子之间的相互碰撞把气体粒子由低能级激发到高能级产生受激跃迁从而得到紫外激光。固体介质是用非线性倍频晶体的方式在经过一次及以上的频率转换产生向外辐射的紫外激光。准分子和全固态紫外激光器常用于激光加工和处理[1]。紫外激光器的分类如表 1。

2.1. 准分子激光器

气体紫外激光器主要有准分子激光器、氩离子激光器、氮分子激光器、氟分子激光器、氦镭激光器等。准分子激光器等通常用于激光加工[2]。准分子激光器是以准分子为工作物质的气体激光器,它也是一种脉冲激光器,从 1971 年第一台准分子激光器的诞生[3],就有了巨大的研究意义。准分子是一种不稳

定复合的分子，在一定情况下会分解成原子。重复频率和平均功率为评判准分子激光器的依据。一定比例的 Ar、Kr、Xe 等的稀有气体和 F、Cl、Br 等的卤族元素相混合是紫外气体激光器的主要工作物质，实现泵浦的方法是用电子束或脉冲放电达到。基态的惰性气体原子和稀有气体原子受激发后，核外电子从而被激发到更高的轨道使最外层电子层被填满，并与其他原子结合形成准分子，随后跃迁回基态再分解成原来的原子，剩余能量以光子的形式分离出来最后经过谐振腔的放大得到紫外激光如图 1 所示[1]。液态氙为早期的准分激光器的工作物质。现在的准分子激光器还包括 193 nm 的 ArF 激光器，248 nm 的 KrF 激光器和 308 nm 的 XeCl 激光等。

Table 1. Classification of UV lasers

表 1. 紫外激光器的分类

紫外激光器的分类	光斑形状和波长	特性
固态调 Q Nd:YAG 激光器	波长: 353 nm 光斑: 圆形(能量从中心到边缘逐渐下降) 聚焦量级为 10 μm 量级	温度敏感性高, 在冷启动一段时间后才达到稳定。重复频率高、聚焦光斑小, 适合小尺寸加工
准分子激光器(气体激光器)	波长: 取决于气体类型 光斑: 矩形 (掩膜技术可产生不同几何形状的光斑)	加工的细节可小到几微米, 而聚焦镜与工件之间的距离可大到 50 到 100 mm
金属蒸汽激光器(主要使用铜蒸汽)	波长: 通过混频和倍频使波长为 511 nm 和 578 nm 的铜蒸汽产生波长为 255 nm, 271 nm, 289 nm 的紫外光。光束分为高斯分布。	适用范围同固态紫外激光器, 应用范围广

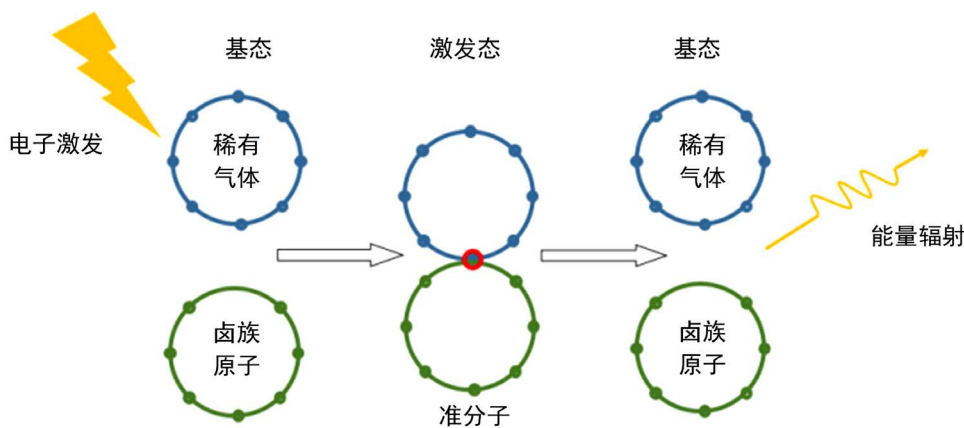


Figure 1. Schematic diagram of excimer laser generation

图 1. 准分子激光产生原理图

2.2. 固态紫外激光器

全固态紫外激光器的突出优点有便捷体积小、可靠性高和工作稳定等。最常用的是 LD 泵浦惯用的 Nd:YAG 晶体，再进行倍频如图 2 所示[4]。

产生紫外固体激光器的主要步骤是首先激光器内的泵浦光源照射到增强介质上从而实现粒子数反转 [5]，基波红光在谐振腔内形成并且振荡，再通过一次或多次非线性晶体腔内倍频，在经过透射、反射最终从谐振腔输出所需的紫外激光。通常采用 LD 二极管泵浦和灯泵浦的方法得到紫外固体激光器。全固态紫外激光器即 LD 泵浦的紫外固体激光器，其光路原理如图 3 所示[1]。

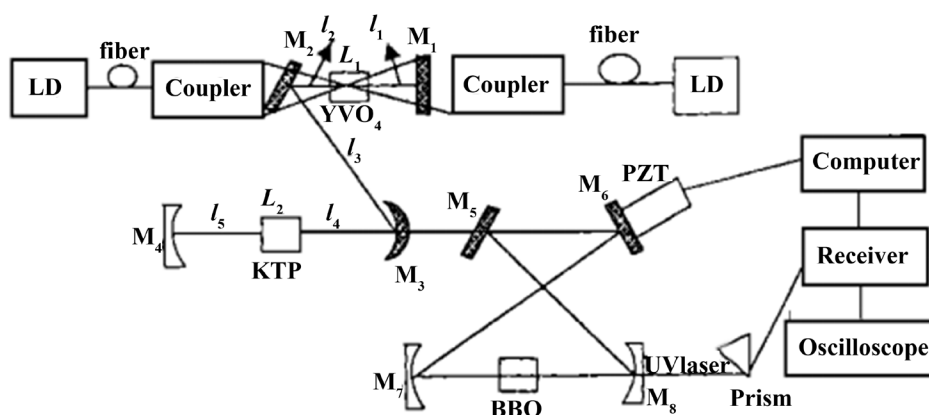


Figure 2. Experimental set up of the ultraviolet laser

图 2. 全固态紫外激光器实验装置

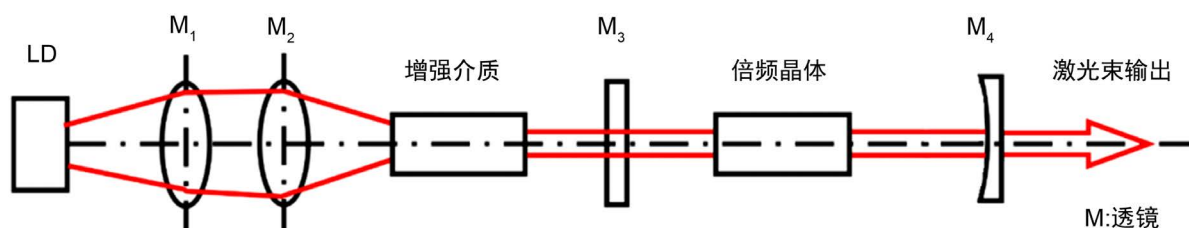


Figure 3. Schematic diagram of optical path in diode pumped solid state laser

图 3. 全固态激光器光路原理图

Nd:YAG (掺钕钇铝石榴石)和 Nd:YVO₄ (掺钕钒酸钇)是两种比较常见的增强介质晶体。常用的增强谐振腔的方法是用波长为 808 nm 的小型半导体激光二极管 LD 泵浦 Nd:YVO₄ 激光晶体产生 1064 nm 的近红外光,腔内倍频输出波长为 532 nm 的绿光,再送入增强谐振腔进行四倍频,输出波长为 266nm 的深紫外激光,基频绿光输入阈值可低到 215 mW [6]。与 Nd:YAG 比较, Nd:YVO₄ 激光晶体具有更大的增益截面,是 Nd:YAG 的 4 倍;吸收系数大,是 Nd:YAG 的 5 倍,有激光阈值低等优点。Nd:YAG 晶体的机械强度比较高,光线的透射率高,荧光寿命长,也不需要过为严苛的散热降温系统,可以适应于广泛的工作使用需求,可以得到较高质量的激光,所以现在国内外通常使用紫外固体激光器会选择 Nd:YAG 晶体来做增益介质。

3. 紫外激光器的应用

紫外激光加工方面有很多优点,也是目前科技信息发展中的首选技术。首先紫外激光器可以输出超短波长的激光,可以精准处理超小细微的材料;其次紫外激光的“冷处理”不会整体破坏材料本身,只是对其表面就行处理;再者基本无热损伤影响[7];一些材料对可见光和红外激光不能有效吸收导致无法加工,紫外最大的优势是基本所有的材料对紫外光吸收较为广泛[8]。紫外激光器尤其是固体紫外激光器的结构紧凑且体积小、简单好维护、易大量生产。紫外激光器在加工处理医用生物材料、刑事案件取证、集成电路板、半导体工业、微光元器件、外科手术[9]、通信和雷达、激光加工割方面应用十分广泛。

3.1. 改变生物材料表面特性

在某些治疗中,许多医用材料需要与人体组织相容,甚至是修复,如紫外激光治疗眼内疾病[10]和兔角膜实验[11]有时也需要改变生物蛋白质特性[12]和生物大分子结构[13],调整准分子紫外激光器最佳脉

冲参数,实验人员再分别用 100 nm、120 nm、200 nm 的激光对医用生物材料表面照射后,从而改善材料表面物理化学结构,并不改变材料整体化学结构,通过培养生物细胞对比实验,使处理后的有机生物材料与人体组织相容性和亲水性有显著性提高,在医用生物应用方面有很大的帮助[14]。

3.2. 刑侦领域

在刑侦领域,当发现指纹同 DNA 一样具有独一无二的特性以来,指纹便可作为刑事案件犯罪嫌疑人的遗留在犯罪现场的重要生物证。曾经旧的方法会导致样品损伤,难以对证物进行收集和存储。现在的研究针对于非渗透性客体表面指纹,如胶带、照片、玻璃等显现具有突出效果。“紫外发光成像技术”和“紫外激光反射成像技术”即波长为 266 nm 的紫外激光照射潜在指纹,分别透过 266 nm 和 340 nm 的带通滤光镜,来观察和记录紫外激光对指纹的检测和采纳收集[15]。实验中的 120 个实验样本有百分之七十都可被成功检测。紫外短波技术提高了潜在指纹的成功率,而且方便快捷容易控制其光学特性,在法庭科学领域有广泛的应用前景。现场唾液斑、脱落细胞、血迹、有毛囊的毛发等常见生物检材探测都可用紫外检测。但是通过短波 266 nm 的紫外激光在固定距离通过不同时长照射生物检材再提取 DNA 进行分析,结果发现短波 266 nm 的紫外激光对指纹、血迹、唾液斑、脱落细胞、有毛囊的毛发 5 种常见生物物证的 DNA 检验结果产生严重影响,但是针对毛发包括毛囊、体液唾液和血液斑痕等的生物 DAN 的检测仅有少部分的影响。短波紫外激光会对部分 DNA 生物检材产生影响,所以在刑侦调查取证时要依据证据作用来慎重选择提取方法[16]。

3.3. 紫外激光在集成电路板上的应用

在工业领域中多种电路板的生产制作过程,从最开始的布线到生产成需要高级工艺的微小精密的嵌入式芯片,集成电路板内的柔性电路、聚合物和铜的层布式电路都需要钻微孔和切割[17],也包括电路板上材料的修复和检测,常需要用到等微细加工和处理。电路板加工中激光微加工技术显然成为最佳选择。激光在加工过程中,工作机器不与被加工产品接触,有效避免机械作用力,加工迅速,灵活性高,并且对工作场合无需特殊要求,通过对激光参数的精准设置和研究设计,可以达到微米以下量级[18]。电路板上用的比较传统的钻孔方式是利用紫外激光器和 CO₂ 激光器用于非金属打标(波长为 10.6 μm 的 CO₂ 激光器用于非金属材料打标;波长 1064 nm 或者 532 nm 一般用于金属材料打标[19])。目前还是主要采用紫外

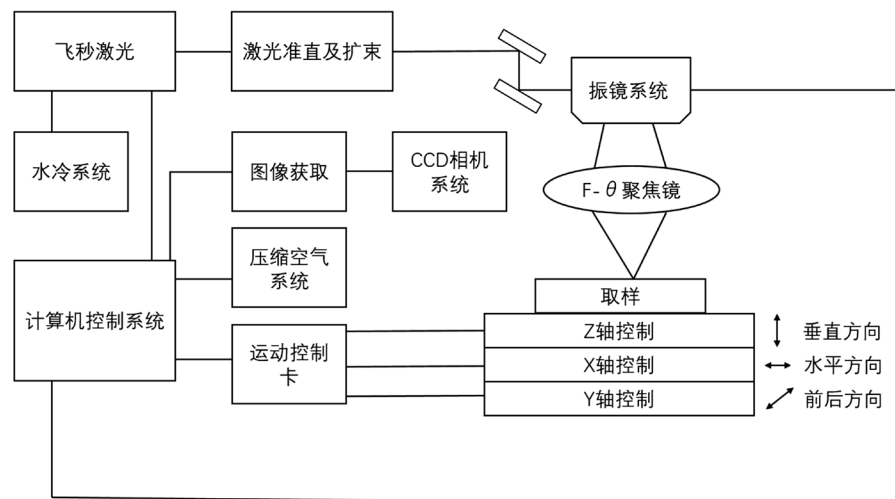


Figure 4. Schematic diagram of femtosecond laser micro machining system

图 4. 飞秒激光微加工系统结构示意图

激光加工技术,可以达到微米级的加工,精确度高,可以制作超细微零器件,可以应用于小于 $1\ \mu\text{m}$ 光斑的激光束的微孔加工。但是 CO_2 激光器主要打 $75\sim 150\ \text{mm}$ 的孔,且小孔易错位,而紫外激光器可以打 $25\ \text{mm}$ 以下的孔,精度高且不会错位[20]。例如在用紫外飞秒激光“冷”加工覆铜线路板中利用综合平衡法得到最优工艺参数,再用选择性刻蚀的特性达到高质量、高效率线宽 $50\ \mu\text{m}$ 、线间距 $20\ \mu\text{m}$ 的覆铜板表面微细线路刻蚀加工[21]如图 4 和图 5 所示。

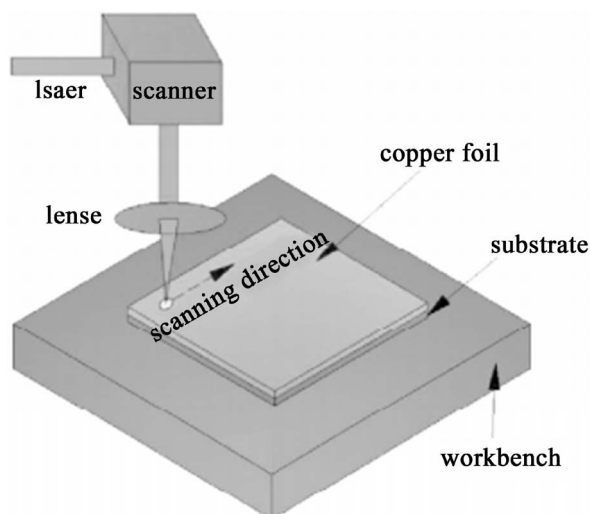


Figure 5. Schematic diagram of direct scanning etching of copper clad plate by a femtosecond laser
图 5. 飞秒激光直接扫描刻蚀覆铜板示意图

3.4. 微光元器件的加工和制备

在科学技术和现代工业的快速发展的信息化时代,要达到在更小空间内搭建更多的实验系统并实现更多的功能,就要加快信息技术的发展更重要的是要制作加工出更小型化、微型化并且仅对材料表面化学键进行处理[22]的功能齐全的器件。在军事雷达通讯[23]、医学治疗、航空航天和生物化学等领域具有重要的应用和研究价值。可以在纳米尺度的微光学元件上进行更加深入的切割和优化并研究和开发应用,



Figure 6. Laser cutting 0.6 mm, 0.38 mm, 0.18 mm thick monocrystalline silicon
图 6. 激光切割 0.6 mm、0.38 mm、0.18 mm 厚单晶硅

转变传统的光学元器件功能和特性。微光学元件具有容易批量生产和易于实现阵列化还有简小轻便灵活等优点,但是它的主要材料是石英玻璃。石英玻璃在应用和处理过程中很容易产生裂纹和凹坑,是一种硬脆性材料,这就使其光学性能大大减弱。因此,紫外激光的直写“冷”加工技术[24]大大提高了微光学器件的效率,迅速完成高精度微细结构的微光元器件加工且不伤材料,可以灵活完成大小批量的不同需求的加工。国外科研机构对紫外激光加工硅片的研究比较早[25],国内起步较晚随后才对硅片切割技术及切

面进行研究[26]。十几年前,张菲等人利用自己研发的紫外全固态激光对微加工系统进行了研究,对相同材质的三种(0.18 mm、0.38 mm、0.6 mm)的硅片进行优化切割,最小孔径 45 μm ,加工精度 20 μm ,结果表明材料没有出现裂痕,激光的热影响较小,飞溅物较少[27]如图 6 所示。

3.5. 紫外激光在半导体产业中的应用

近几年来,紫外激光对半导体材料的微加工受到了越来越多的关注。成千上万的密集电路元件在集成电路中非常常见,所以需要一些高精密的处理和加工方法[28],还有一些高精仪器和器件的硅和蓝宝石等半导体材料等半导体薄膜的精密微加工靠紫外激光且研究薄膜的光谱特性[29],同时紫外激光还可以加大硅材料对光能的利用率,也可以使得硅表面的微结构发生改变,有利于太阳能电池板的研发,如二维微光栅等。

2018 年李奇思等人使用 355 nm 全固态紫外激光器对硼硅玻璃表面和雕刻深度、底面光滑度、通道垂直情况进行研究,实验分析优化加工参数,得到了材料表面损伤小、裂纹少、雕刻深度大、切面垂直且平整的硼硅玻璃微通道[30]如图 7 所示。

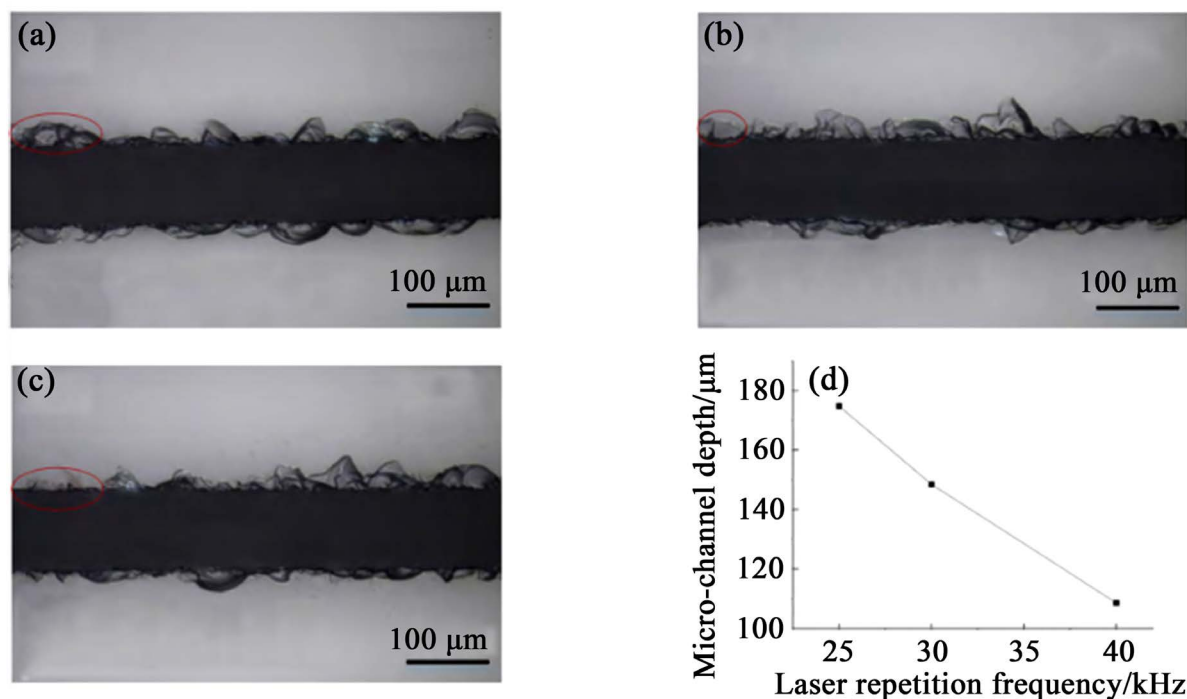


Figure 7. Surface morphologies and depths of micro-channels in borosilicate glass by ultraviolet laser etching under different scanning speeds. (a) 40 KHZ; (b) 30 KHZ; (c) 25 KHZ; (d) Micro-channel depth versus laser repetition frequency

图 7. 不同重复频率下紫外激光刻蚀硼硅玻璃微通道的表面形貌和微通道深度。(a) 40 KHZ; (b) 30 KHZ; (c) 25 KHZ; (d) 微通道深度随激光重复频率的变化

4. 结束语

通过这几十年的发展和研究,紫外激光器的技术和应用越来越广泛和成熟,它最有特点的精细的“冷”加工技术在不改变物体物理性质的同时对表面进行微加工和处理,广泛应用于通讯、光学、军事、刑侦、医疗等各个行业和领域。例如,5G 时代,催生了 FPC 加工市场需求。随着 5G 产业的进一步发展,以及各大电子产品制造商对柔性 OLED 显示屏的追逐,催生了市场对 FPC 柔性线路板的需求迅猛增长,随之而来对紫外激光器的需求也将得到快速增长。这个发展趋势将有望快速促进紫外技术自身的发展,以在

功率和脉宽方面实现更大的突破,同时拓展出更多新的应用领域。紫外激光机的应用,让FPC等材料的精密冷加工成为可能,而FPC的逐步增加,推动了5G部署,5G的低延迟特性,给诸如云技术、物联网、无人驾驶、VR等新一波的技术发展提供了无限生机。当然这是个相辅相成的概念,新技术新应用也最终会拉动紫外激光的进一步发展。

随着越来越多的新型的倍频晶体和增益介质的出现,越短波长功率越高的紫外激光器将在未来应用于更多的行业,促进各行各业的发展,紫外激光在加工领域更加智能、高效精准、高重复率、高稳定性是未来发展的趋势。

基金项目

海南省高等学校科学研究项目(Hnky2020-24)、海南省自然科学基金(2018CXTD336, 618QN241)资助、海南省重大科技计划项目(ZDKJ2019005)、海南省基础与应用基础研究计划(自然科学领域)高层次人才项目(2019RC190, 2019RC192)、海南省科协青年科技英才学术创新计划项目(QCXM201810)、国家自然科学基金项目(61864002, 61964007)和中国工程科技发展战略项目(19-HN-XZ-07)。

参考文献

- [1] 聂世琳, 管迎春. 紫外激光器及其在微加工中的应用[J]. 光电工程, 2017, 44(12): 1169-1251.
- [2] 唐娟, 廖健宏, 蒙红云, 等. 紫外激光器及其在激光加工中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2007, 44(8): 52-56.
- [3] 凡瑞霞, 王永强, 曹伟涛. 紫外光源与紫外激光器现状[J]. 焦作大学学报, 2006, 20(3): 59-68.
- [4] 陈国夫, 王贤华, 杜戈果. 全固态紫外激光器研究[J]. 光子学报, 1999, 28(9): 785-788.
- [5] 孔庆鑫, 任怀瑾, 鲁燕华, 等. 全固态紫外激光器研究进展[J]. 光通信技术, 2017, 41(5): 34-37.
- [6] 田明, 王菲, 李玉瑶, 等. 大功率准连续 355 nm 紫外全固态激光器的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(8): 120-123.
- [7] Dittmara, H., Gäbler, F. and Stute, U. (2013) UV-Laser Ablation of Fibre Reinforced Composites with ns-Pulses. *Physics Procedia*, **41**, 266-275. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2013.03.078>
- [8] 刘学青. 干法刻蚀辅助飞秒激光加工技术研究[D]: [博士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2017: 2-9.
- [9] Colombelli, J., Reynaud, E.G. and Stelzer, E.H.K. (2005) Subcellular Nanosurgery with a Pulsed Subnanosecond UV-A Laser. *Medical Laser Application*, **20**, 217-222. <https://doi.org/10.1016/j.mla.2005.07.003>
- [10] Hammer, C.M., Dipl-Biol, Kunert, K.S., et al. (2018) Interface Morphology and Gas Production by a Refractive 347 nm Ultraviolet Femtosecond Laser: Comparison with Established Laser Systems. *Journal of Cataract & Refractive Surgery*, **44**, 1371-1377. <https://doi.org/10.1016/j.jcrs.2018.05.030>
- [11] Shi, K.W., Kar, Y.B., Talik, N.A. and Yew, L.W. (2017) Ultraviolet Laser Diode Ablation Process for CMOS 45 nm Copper Low-K Semiconductor Wafer. *Procedia Engineering*, **184**, 360-369. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.106>
- [12] 黄汝多, 查向栋, 李振华, 等. XeCl 准分子紫外激光辐照生物大分子 BSA(V)对其蛋白质结构的影响[J]. 激光生物学报, 2007, 16(4): 379-389.
- [13] 黄汝多, 朱峰, 陈彦, 等. XeCl (308 nm)准分子紫外激光对生物大分子酵母甘露聚糖分子结构的辐照效应[J]. 激光生物学报, 2009, 18(4): 440-449.
- [14] 储彬, 于辉, 张灵敏, 等. 紫外准分子激光照射对生物材料改性影响[J]. 激光杂志, 2010, 31(5): 40-41.
- [15] 蔡能斌, 徐宝楨, 孙文鼎, 等. 紫外激光成像装置显现潜指印的研究与应用[J]. 中国人民公安大学学报, 2011, 69(3): 1-4.
- [16] 蔡能斌, 顾丽华, 黄晓春, 等. 紫外激光探测对常见现场生物物证 DNA 检验的影响[J]. 影像技术, 2011(6): 26-29.
- [17] 张菲, 段军, 曾晓雁, 等. 355 nm 紫外激光器加工多层柔性线路板盲孔[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(1): 143-146.
- [18] Henning, S., et al. (2016) Processing of Polyamide Electrospun Nanofibers with Picosecond UV Laser Irradiation. *Physics Procedia*, **20**, 217-222.

- [19] 张秋鄂, 任玉柏. 小型精密 CO₂ 激光打孔机[J]. 长春光学精密机械学院学报, 1997, 20(4): 46-49.
- [20] 揭彦秋. 精细激光工业加工的应用概况[J]. 激光技术与应用, 2007(6): 24-26.
- [21] 倪超, 王明娣, 施克明, 等. 飞秒激光刻蚀 FR-4 覆铜板成形微细线路研究[J]. 激光与红外, 2019, 49(4): 410-417.
- [22] 邵江锋, 华灯鑫, 汪丽, 等. 全天时紫外高光谱瑞利测温激光雷达系统[J]. 光学学报, 2017, 37(6): 22-30.
- [23] Adhi, K.P. (2004) Chemical Modifications in Femtosecond Ultraviolet (248 nm) Excimer Laser Radiation-Processed Polyimide. *Applied Surface Science*, **225**, 324-331. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2003.10.034>
- [24] 徐东. 紫外纳秒激光直写铜膜微结构的研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2014: 5-6.
- [25] 刘晨星, 张大勇. 紫外激光与半导体相互作用研究进展综述[J]. 光电技术应用, 2012, 27(2): 21-26.
- [26] 崔建丰, 赵晶, 樊仲维, 等. 厚硅片的高速激光切片研究[J]. 光学精密工程, 2006, 14(5): 829-834.
- [27] 张菲, 杨焕, 段军, 等. 355 nm 全固态紫外激光切割硅片的研究[C]//第十六届全国半导体集成电路硅材料学术会议论文集. 武汉: 华中科技大学, 2009: 1-6.
- [28] Sotnikov, A., Laux, H. and Stritzker, B. (2010) Experimental and Numerical Optimization of Beam Shapes for Short-Pulse Ultraviolet Laser Cutting Processing. *Physics Procedia*, **5**, 137-146. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2010.08.130>
- [29] Cachoncinlle, C., Millon, E., Petit, A. and Nistor, M. (2017) Random Lasing in Wide-Gap Semiconductor Thin Films under Deep UV Pulsed Laser Pumping. *Materials Today*, **4**, S52-S61. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.05.010>
- [30] 李奇思, 梁庭, 雷程, 等. 355 nm 全固态紫外激光直写刻蚀硼硅玻璃微通道[J]. 中国激光, 2018, 45(8): 73-80.