

## 激光清洗技术在芯片封装模具中的应用

杨金芳 何涛涛 安浦瑞 杨沛年 袁诗超 毕超 田新叶 汪满 张进兵 李泽靖 令维军

### Application of laser cleaning technology in chip packaging molds

YANG Jin-fang, HE Tao-tao, AN Pu-rui, YANG Pei-nian, YUAN Shi-chao, BI Chao, TIAN Xin-ye, WANG Man, ZHANG Jin-bing, LI Ze-jing, LING Wei-jun

引用本文:

杨金芳, 何涛涛, 安浦瑞, 杨沛年, 袁诗超, 毕超, 田新叶, 汪满, 张进兵, 李泽靖, 令维军. 激光清洗技术在芯片封装模具中的应用[J]. *中国光学*, 2026, 19(1): 49–59. doi: 10.37188/CO.2025–0122

YANG Jin-fang, HE Tao-tao, AN Pu-rui, YANG Pei-nian, YUAN Shi-chao, BI Chao, TIAN Xin-ye, WANG Man, ZHANG Jin-bing, LI Ze-jing, LING Wei-jun. Application of laser cleaning technology in chip packaging molds[J]. *Chinese Optics*, 2026, 19(1): 49–59. doi: 10.37188/CO.2025–0122

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2025–0122>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 用于碟式微流控芯片的尿液生化检测系统研制及应用

Development and application of urine biochemical detection system for a disc microfluidic chip  
*中国光学 (中英文)*. 2021, 14(6): 1317 <https://doi.org/10.37188/CO.2021–0067>

#### 运动探测及可见光通信一体化氮化物光电子芯片

Integrated Nitride optoelectronic chip for motion detection and visible light communication  
*中国光学 (中英文)*. 2023, 16(5): 1257 <https://doi.org/10.37188/CO.2023–0028>

#### 半导体激光器侧向模式控制技术的研究进展

Recent advances in lateral mode control technology of diode lasers  
*中国光学 (中英文)*. 2022, 15(5): 895 <https://doi.org/10.37188/CO.2022–0143>

#### 激光在医疗领域中的应用

Application of laser in the medical field  
*中国光学 (中英文)*. 2023, 16(2): 283 <https://doi.org/10.37188/CO.2023–0017>

#### 面结构光在机检测的叶片反光抑制技术

Blade reflection suppression technology based on surface structured light on-machine detection  
*中国光学 (中英文)*. 2022, 15(3): 464 <https://doi.org/10.37188/CO.2021–0194>

#### 光致热弹光谱气体检测技术研究进展

Research progress of gas detection based on laser-induced thermoelastic spectroscopy  
*中国光学 (中英文)*. 2023, 16(2): 229 <https://doi.org/10.37188/CO.2022–0137>

文章编号 2097-1842(2026)01-0049-11

## 激光清洗技术在芯片封装模具中的应用

杨金芳<sup>1,2,3,4</sup>, 何涛涛<sup>1,3</sup>, 安浦瑞<sup>1,3</sup>, 杨沛年<sup>1,3</sup>, 袁诗超<sup>1,3</sup>, 毕超<sup>1,3</sup>, 田新叶<sup>1,3</sup>, 汪满<sup>1,3</sup>,  
张进兵<sup>2,5</sup>, 李泽靖<sup>2,5</sup>, 令维军<sup>1,2,3,4\*</sup>

1. 甘肃省全固态激光工程研究中心, 甘肃天水 741001;
2. 集成电路封装测试教育部工程研究中心, 甘肃天水 741001;
3. 天水师范大学电子信息与电气工程学院, 甘肃天水 741001;
4. 甘肃省集成电路封装测试产业研究院, 甘肃天水 741001;
5. 天水华天科技股份有限公司, 甘肃天水 741001)

**摘要:**激光清洗技术作为一种高效、环保的表面处理手段,在芯片封装模具清洗领域具有重要的应用潜力。本文系统探究了激光参数(脉冲宽度、重复频率、平均功率)对基材为P20合金和ASP23合金镀铬的模具表面环氧塑封料(EMC)污染物的清洗效果影响。实验采用1064 nm掺钕脉冲激光器,将高斯光束整形为平顶光束,结合振镜"弓"字扫描路径,以单一变量法优化工艺参数。实验结果表明,激光能量密度为0.55–0.77 J/cm<sup>2</sup>时,需协同调节脉冲宽度与重复频率,以平衡热输入,可实现污染物完全去除且基材零损伤。参数敏感性分析显示,最佳占空比范围为0.8%~1.0%。此外,功率超过阈值(150 ns, 50%或200 ns, 50%)会导致基材损伤,表明参数匹配对清洗效果与材料保护至关重要。本研究为芯片封装模具提供了一种高精度、非接触的绿色清洗方案,验证了激光清洗技术在集成电路领域的可行性。

**关键词:**激光清洗技术;芯片封装模具;占空比;表面处理

中图分类号:TP394.1;TH691.9 文献标志码:A doi:10.37188/CO.2025-0122 CSTR:32171.14.CO.2025-0122

收稿日期:2025-09-18;修订日期:2025-10-14

**基金项目:**国家自然科学基金(No. 62405221, No. 62165012);甘肃省高校产业支撑计划项目(No. 2024CYZC-44);甘肃省重点人才项目(No. 2025RCXM023);甘肃省高校科研创新平台重大培育项目(No. 2024CXPT-12);天水市强科技奖补专项项目(No. TS-STK-2024A-277);秦州区科技计划项目(No. 2024-SHFZG-8159);甘肃省科技计划基础研究计划项目(No. 25JRRE009, No. 25JRZE003, No. 25JRRE003);甘肃省高校研究生创新之星项目(No. 2025CXZX-985);天水师范大学研究生创新引导立项项目(No. TYCX2441)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 62405221, No. 62165012); Gansu Province University Industry Support Plan Project (No. 2024CYZC-44); Key Talent Project of Gansu Province (No. 2025RCXM023); Major Cultivation Project of University Research and Innovation Platform of Gansu Provincial Department of Education (No. 2024CXPT-12); Tianshui Strong Science and Technology Award Special Project (No. TS-STK-2024A-277); Qinzhou District Science and Technology Plan Project (No. 2024-SHFZG-8159); Basic Research Program of Gansu Provincial Science and Technology Plan (No. 25JRRE009, No. 25JRZE003, No. 25JRRE003); Gansu Province University Graduate Student Innovation Star Project (No. 2025CXZX-985); Postgraduate Research Innovation Guiding Project of Tianshui Normal University (No. TYCX2441)

## Application of laser cleaning technology in chip packaging molds

YANG Jin-fang<sup>1,2,3,4</sup>, HE Tao-tao<sup>1,3</sup>, AN Pu-rui<sup>1,3</sup>, YANG Pei-nian<sup>1,3</sup>, YUAN Shi-chao<sup>1,3</sup>, BI Chao<sup>1,3</sup>,  
TIAN Xin-ye<sup>1,3</sup>, WANG Man<sup>1,3</sup>, ZHANG Jin-bing<sup>2,5</sup>, LI Ze-jing<sup>2,5</sup>, LING Wei-jun<sup>1,2,3,4\*</sup>

(1. *Gansu Provincial All Solid-State Laser Engineering Research Center,  
Tianshui Normal University, Tianshui 741001, China;*

2. *Engineering Research Center of Integrated Circuit Packaging and Testing,  
Ministry of Education, Tianshui 741001, China;*

3. *School of Electronic Information and Electrical Engineering,  
Tianshui Normal University, Tianshui 741001, China;*

4. *Gansu Integrated Circuit Packaging and Testing Industry Research Institute, Tianshui 741001, China;*

5. *Tianshui Huatian Technology Co., Ltd., Tianshui 741001, China)*

\* *Corresponding author, E-mail: wjlings@sina.com*

**Abstract:** Laser cleaning technology, as an efficient and environmentally friendly surface treatment method, plays significant application potential in the field of chip packaging molds cleaning. This research systematically investigated the effects of laser parameters (pulse duration, repetition rate, average power) on the cleaning effect of Epoxy Molding Compound (EMC) contaminates from mold surface coated with chromium on P20 alloy and ASP23 alloy substrates. The experiment employed a 1 064 nm Nd-doped pulsed laser, reshaping the Gaussian beam into a flat-top beam, and combining with a "bow" shape scanning path of the galvanometer mirror. The process parameters were optimized using a single-variable method. The experimental results indicate that when the laser energy density is in 0.55–0.77 J/cm<sup>2</sup>, the pulse duration and repetition rate need to be adjusted in coordination to balance the thermal input, enabling complete removal of contaminants without any damage to the substrate. Parameter sensitivity analysis reveals that the optimal duty cycle range is from 0.8% to 1.0%. Furthermore, when the power exceeds the threshold (150 ns@50% average power or 200 ns@50% average power), it may cause damage to the substrate, which indicates that laser parameter matching is crucial for the cleaning effect and material protection. This research provides a high-precision, non-contact and environmentally friendly cleaning solution for chip packaging molds, and verifies the feasibility of laser cleaning technology in the field of integrated circuits.

**Key words:** laser cleaning technology; chip packaging mold; duty cycle; surface treatment

## 1 引 言

当今集成电路产业发展迅猛,未来国产芯片替代进口芯片已成定局,相关产业应用亟待发展。晶圆清洗、半导体基片清洗、模具清洗以及电子线路清洗贯穿整个产业<sup>[1-5]</sup>,是影响芯片质量和性能的关键工艺,拥有 400 亿以上的市场空间,对芯片生产的良品率和厂商经济效益都有着至关重要的影响。

芯片产业链大致可以分成设计、制造和封装测试等三部分。在封装测试部分,芯片塑封是非常重要的一个环节,对工艺的要求极高。塑封工艺主要体现在芯片封装模具的精度够不够高,表面是否干净有损伤。芯片封装模具作为半导体制造过程中的关键工具,其表面质量直接影响芯片产品的良率和性能稳定性。然而,在长期使用过程中,模具表面不可避免地会积累有机残留物、氧化物和微粒污染物等多种污染物,导致表面形貌精度和平整度下降,进而影响芯片封

装质量。

传统的化学清洗和物理研磨等处理方法存在清洗效率低、运营成本高、产生二次污染等固有缺陷,已难以满足当前日益严格的环保法规要求。而近几年新发展的激光清洗技术恰好可以解决上述技术瓶颈。其凭借非接触式处理、环保和高效精准等特性,在精密模具清洗领域展现出显著的技术优势<sup>[6-8]</sup>,被誉为“21世纪最具潜力绿色清洗技术”。值得注意的是,尽管激光清洗技术在工业清洗领域已有广泛应用,但其在芯片封装模具清洗方面的研究与应用仍处于空白状态<sup>[9-13]</sup>。该技术不仅能有效解决传统清洗方法的局限性,还具有选择性清洗微纳结构和实现局部精准处理等独特优势,完全契合芯片封装模具的精密清洗需求。因此,激光清洗技术在芯片封装模具清洗领域具有重要的研究价值和广阔的应用前景。

激光清洗技术的早期研发与探索工作,在国外开展得更早。1969年,美国学者 S.M. Bedair 开启了激光清洗领域的先河。他不仅首次提出该概念,还通过红宝石调 Q 激光,在保护硅基材基体不受损的同时,高效清除了其表面的污染层<sup>[14]</sup>。国外激光清洗发展较为成熟,主要研究单位有德国 CleanLASER、美国 IPG Photonics 公司、EWI 研究所、意大利 EL.EN. S.p.A、比利时 P-Laser、美国 Laser Photonics 公司、德国 4JET 公司等<sup>[15-17]</sup>。我国激光清洗技术的研究及设备研发开始时间较晚,进入 2010 年后,国内逐渐加大对该领域的理论探索与实验研究,且部分高校、科研机构和高科技企业也同步加强了集成清洗设备的研发力度<sup>[18-22]</sup>。目前,国内具有激光清洗能力的单位主要有哈尔滨工业大学、华中科技大学、四川大学、中国科学院半导体研究所、大族激光等<sup>[23]</sup>。我国激光清洗研究进程跟踪国外发展,短期虽有成果但差距较大,国内成熟设备少、且多集中于实验室研发阶段。

本文旨在探索一种兼具高效、环保、非接触、无损伤特点的激光清洗技术,围绕激光与物质相互作用规律,系统研究激光清洗模具的作用机制,探究脉宽、能量密度、激光波长、扫描速度等参数对激光清洗效果的影响,解决集成电路封装测试企业在模具清洗工序中效率低下和芯片损伤问题。

## 2 实验过程

### 2.1 激光清洗技术

激光清洗作为一项先进的表面处理技术,其核心在于利用激光束的高能量密度和高度聚焦性,对材料表面的附着物进行精确处理,以实现清洁的目的。激光与材料之间的相互作用机制复杂而精妙,主要涉及到光的吸收、热效应以及物理化学反应等多个方面<sup>[24-28]</sup>。

首先,激光束在照射到被清洁物体的表面时,其能量主要被材料表面的附着物吸收。这些附着物包括氧化物、锈蚀物、油污等,它们对特定波长的激光能量有很高的吸收率。吸收激光能量后,附着物体的温度迅速上升,部分物质可能会因为高温而瞬间汽化或发生热膨胀。例如,在对青铜器进行激光清洗时,激光束聚焦于锈蚀部分,使得局部温度极高,促使锈蚀物汽化并脱离被清洗物料<sup>[29-33]</sup>。

其次,激光束的能量密度大,能够在很小的作用区域内产生高温,这样的高温不仅能使附着物物态发生变化,而且还能对材料表面产生机械作用力。在激光束作用下,被清洁物体的材料会发生局部的物理反应,如热机械作用导致的微小形变,这种形变有助于分离那些通过单纯的热作用无法去除的顽固污渍<sup>[34-36]</sup>。

激光器在激光模式上一般是指激光束垂直于光束传播方向平面内的能量分布情况,分为单模和多模。如图 1(彩图见期刊电子版)所示,单模激光在空间中呈现高斯分布的形式,具有中间光束强度高,两翼逐渐下降的轮廓。

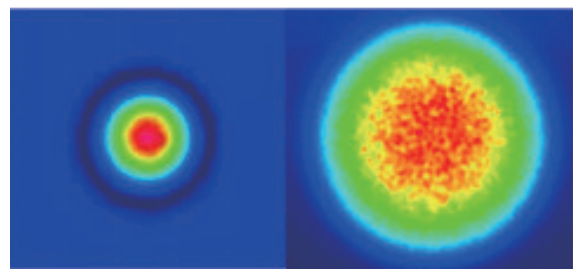


图 1 激光器多模和单模激光光束能量仿真图

Fig. 1 Simulation diagrams of laser beam energy for multimode and single-mode lasers

由于高斯光束能量分布不均匀,在光束中间

能量分布较高,使用时可能会对基材产生损伤。此外,在光束的两翼,能量出现锐减,从而降低能量利用率,出现能量浪费的情况。表 1 给出了单模和多模的清洗效果对比。由表 1 可以看出,对能量分布有特定需求时,可将高斯光束整形为平顶光束。这样可使激光能量分布较为均匀,从而提高能量的利用率。

表 1 激光器单模和多模清洗效果对比

Tab. 1 Comparison of single-mode and multimode laser cleaning effect

激光模式	能量分布	工作能力	工作效率	基材损伤	适用场景
单模	中间强,两翼弱	强	较差	有/轻微	除锈
多模	分布均匀	较差	强	轻微/无	模具

## 2.2 实验过程

模具清洗实验中,采用了 LQFP(1414) 型塑封模具镶件,其尺寸为 230 mm×52 mm×15 mm,模具模盒基底材料是 P20 合金(预硬化塑料模具钢),镶件是 ASP23 合金(铬钼钒粉末高速钢),表面镀有 0.2 μm 的铬,芯片封装过程中产生的污染物则附着在 0.2 μm 的铬镀层上方。封装材料采用环氧塑封料 (EMC), 主要由环氧树脂、酚醛固化剂、碳黑和硅微粉等组成。除硅微粉外,其余均为高分子有机物,包含元素主要为碳氢氧等。鉴于清洗材料的特殊性,则只采用干式清洗。图 2 展示了模具表面污染图与新模具表面原貌图区别,且图 2(a)画圈部分为激光清洗后的表面图。

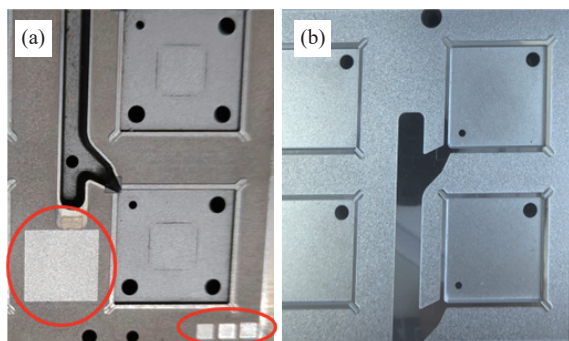


图 2 (a)模具表面污染图;(b)模具表面原貌图

Fig. 2 (a) Mold surface contamination diagram; (b) original appearance diagram of the mold surface

激光清洗装置如图 3 所示,主要采用掺铈脉冲光纤激光器。实验中通过引入折射式光束整形

器,将激光器输出的高斯光束转换为平顶光束。工作中采用多片专门设计的非球面透镜,这些透镜能够对入射的高斯光束进行重新分配。将激光器输出的高斯光束整形为平顶光束,通过振镜 X, Y 反射及场镜输出激光光束。激光器的参数见表 2,波长为 1064 nm,最大平均输出功率为 500 W,功率调节范围 0~100%,脉冲宽度为 30~500 ns,最大单脉冲能量为 50 mJ,重复频率为 1~4000 kHz。1064 nm 激光在该基材中的吸收率低于污染物的吸收率,故可减少基材能量沉积。

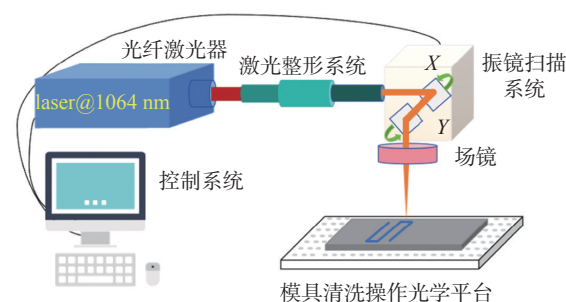


图 3 激光清洗系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the laser cleaning system

表 2 激光器和清洗系统参数

Tab. 2 Parameters of the laser and cleaning system

名称	数值
波长( $\lambda$ )/nm	1064
平均功率( $P$ )/W	0~500
脉冲宽度( $w$ )/ns	30~500
重复频率( $f$ )/kHz	1~4000
振镜规格/mm	110×110

经过对激光清洗工艺的研究,决定采用“弓”字填充进行扫描清洗。激光清洗的影响参数分别是激光波长、脉冲宽度、重复频率、输出功率和扫描速度。通过分析模具上污染物的成分来选择激光器适配参数。接下来将深入研究激光脉冲宽度、重复频率、输出功率对模具清洗效果的影响规律,对不同的工艺参数采用单一变量原则进行实验验证。对于受到激光烧蚀剥离脱落下来的基材上的污染物,利用吸尘辅助系统进行吸收,防止对清洗过的模具表面造成二次污染。为了研究激光清洗效果,使用电子显微镜观察芯片封装模具表面的形态变化。

### 3 实验结果分析

首先, 固定激光器的脉宽为 150 ns, 重复频率为 54 kHz, 输出功率分别为最大功率 500 W 的 10%、20%、30%、40%、50%、60%、70%、80%。根据清洗效果, 确定最大功率的 30%~40% 时清洗效果最佳。再将功率 30%~40% 以 2.5% 为间隔进行再次清洗, 以确定最佳清洗参数对应的单脉冲能量, 如表 3 所示。

表 3 脉宽 150 ns 和重频 54 kHz 下, 不同功率对应单脉冲能量的值

Tab. 3 Single-pulse energy at different power levels under a pulse width of 150 ns and a repetition rate of 54 kHz

功率(500 W)	单脉冲能量(mJ)	功率(500 W)	单脉冲能量(mJ)
10%	0.93	30.0%	2.78
20%	1.85	32.5%	3.01
30%	2.78	35.0%	3.24
40%	3.70	37.5%	3.47
50%	4.63	40.0%	3.70
60%	5.56	\	\
70%	6.48	\	\
80%	7.41	\	\

根据单一变量的原则, 将脉冲宽度和重复频率分别固定为 150 ns 和 54 kHz, 输出功率以最大功率的 10% 为间隔进行测试, 如图 4(彩图见期刊电子版)所示。可得出以下结论: 最佳输出功率范围为最大功率的 30%~40% 时, 对应的单脉冲能量最佳范围为 2.78~3.70 mJ, 该范围内清洗效果最佳。输出功率为最大功率的 30% 时, 激光清洗程度基本可以达到 80%; 输出功率为最大功率的 50% 时, 基材初现损伤; 输出功率达到最大功率的 80% 时, 基材完全损伤, 清洗效果如图 5 所示。

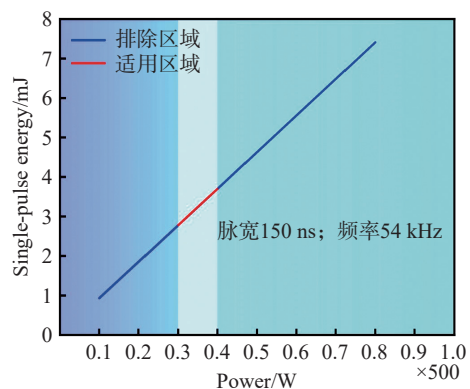


图 4 脉宽 150 ns, 重频 54 kHz 时, 单脉冲能量最佳范围图

Fig. 4 Optimal single-pulse energy range diagram at a pulse width of 150 ns and a repetition rate of 54 kHz

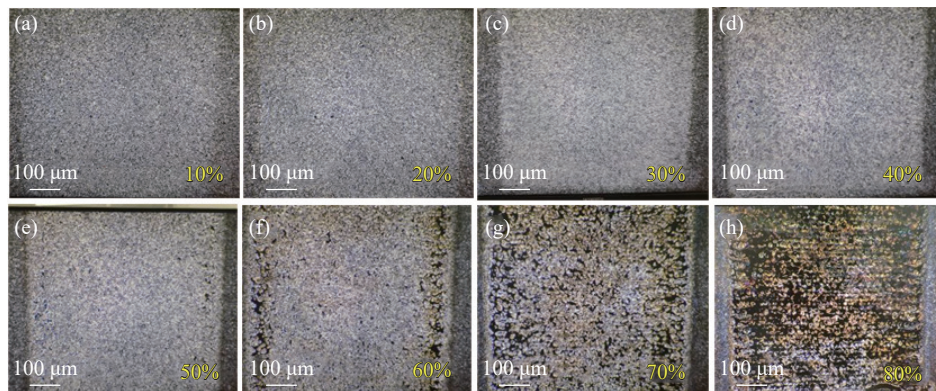


图 5 脉宽为 150 ns 和重频为 54 kHz, 功率分别为最大功率的 (a) 10%、(b) 20%、(c) 30%、(d) 40%、(e) 50%、(f) 60%、(g) 70%、(h) 80% 时, 激光清洗显微镜样貌图

Fig. 5 Microscopic images of the surfaces cleaned by lasers with a pulse width of 150 ns and repetition rate of 54 kHz, and (a) 10%, (b) 20%, (c) 30%, (d) 40%, (e) 50%, (f) 60%, (g) 70%, (h) 80% of the maximum power

接着, 在输出功率为最大功率的 30%~40% 范围内以 2.5% 间隔进行测试。可见, 在功率输出为 35% (175 W) 时, 清洗效果差异不大, 能量密度为 0.65 J/cm<sup>2</sup> 左右时, 通过电子显微镜观察到芯

片封装模具表面几乎没有污染物残留, 为最佳清洗效果, 如图 6(彩图见期刊电子版)所示。在激光清洗过程中, 随着功率的不断增大, 基材损伤的定性判定可围绕外观、微观两方面建立标准。基

材表面由原来的灰色逐渐变得透亮,清洗效果逐渐明显。当功率达到一定值时,清洗过的基材表面不在有原本存在的灰色污染物。通过与无污染基材表面进行对比,芯片封装模具表面全部显示

透亮效果,基材表面干净程度与无污染基材基本保持一致。通过电子显微镜观察发现,若表面出现微裂纹,即使外观无异常,也可判定为隐性损伤(易导致模具后续使用中开裂)。

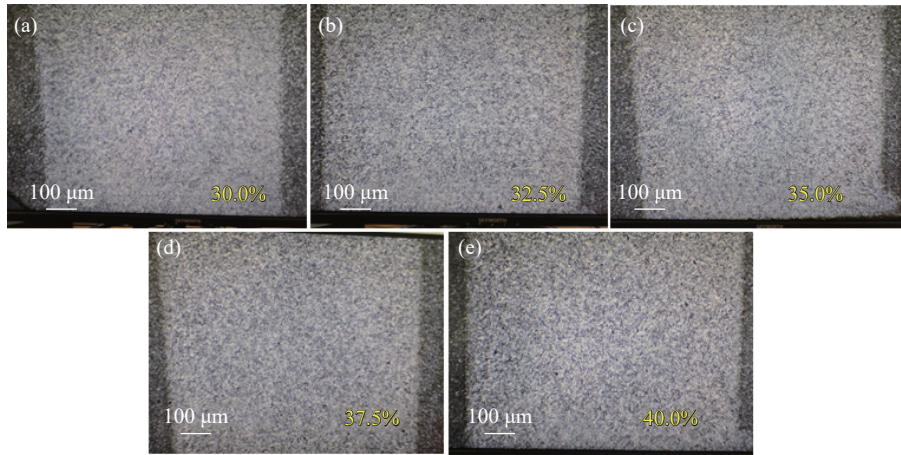


图 6 固定脉宽为 150 ns,重频为 54 kHz 时,功率分别为最大功率的 (a) 30%、(b) 32.5%、(c) 35%、(d) 37.5%、(e) 40% 激光清洗显微镜样貌图

Fig. 6 Microscopic images of the surfaces cleaned by lasers with a pulse width of 150 ns and repetition rate of 54 kHz, and (a) 30%, (b) 32.5%, (c) 35%, (d) 37.5%, (e) 40% of the maximum power

然后,固定脉宽为 200 ns,重复频率为 45 kHz,选取平均输出功率分别为最大功率的 15%、20%、25%、30%、35%、40%、45%、50%。根据清洗效果,确定在功率为最大输出功率的 32.5%~37.5% 时,清洗效果最佳。再取最大功率的 32.5%~37.5% 范围进行实验,以 2.5% 为间隔进行再次清洗,从而确定最佳清洗参数相对应的单脉冲能量,如表 4 所示。

表 4 脉宽 200 ns、重频 45 kHz 时不同功率对应单脉冲能量

Tab. 4 Single-pulse energy at different power levels under a pulse width of 200 ns and a repetition rate of 45 kHz

功率(500 W)	单脉冲能量(mJ)	功率(500 W)	单脉冲能量(mJ)
20%	2.22	25%	2.78
25%	2.78	27.5%	3.06
30%	3.33	30%	3.33
35%	3.89	32.5%	3.61
40%	4.44	35.0%	3.89
45%	5.00	\	\
50%	5.56	\	\
55%	6.11	\	\

将脉冲宽度和重复频率分别固定为 200 ns 和 54 kHz,以 5% 为间隔逐渐增大功率,进行测试。当功率设置为最大功率的 20% 时,清洗程度基本可以达到 80%;当功率设置为最大功率的 50% 时,基材初现损伤;当功率达到最大功率的 50% 时,基材完全损伤,清洗效果如图 7(彩图见期刊电子版)所示。再选取功率范围为最大功率的 25%~35% 进行实验,以 2.5% 间隔进行测试,在功率输出为 150 W (30%),能量密度为 0.66 J/cm<sup>2</sup> 左右时,通过电子显微镜观察发现此时清洗效果最佳,如图 8(彩图见期刊电子版)所示。其他清洗情况基本与上一组保持一致。

实验结果表明,激光清洗技术在芯片封装模具清洗中具有显著优势。通过优化激光参数(脉冲宽度、重复频率和输出功率),可以实现高效、精准的清洗效果,同时避免对基材造成损伤。在脉冲宽度为 150 ns,重复频率为 54 kHz、输出功率设置为最大功率的 35% 的条件下,清洗效果最佳。当单脉冲能量为 3.24 mJ 时;在脉冲宽度为 200 ns、重复频率为 45 kHz、功率为 150 W (30%) 的条件下,清洗效果同样优异,能量密度为 0.66 J/cm<sup>2</sup>。两种条件下均能实现模具表面污染物的完全去除,且基材表面无损伤。在脉宽为

200 ns, 重频为 45 kHz 时, 单脉冲能量最佳范围如 图 9(彩图见期刊电子版)所示。

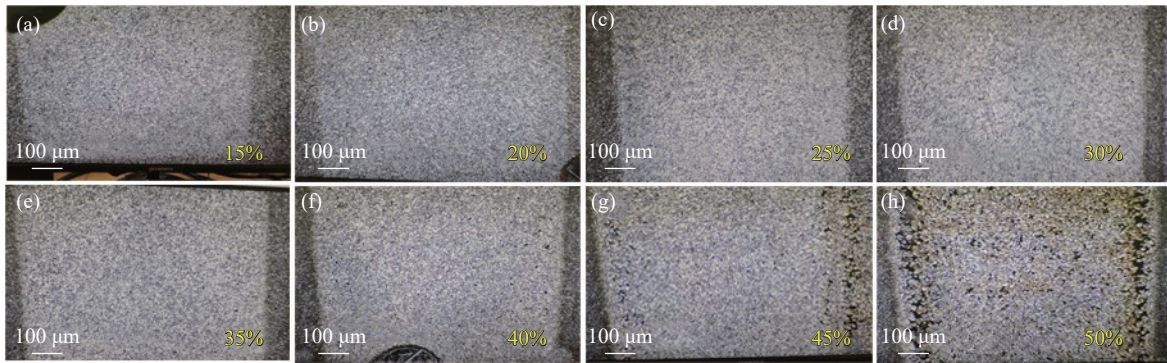


图 7 脉宽 200 ns 和重频 45 kHz 时, 功率分别为最大功率的 (a) 15%、(b) 20%、(c) 25%、(d) 30%、(e) 35%、(f) 40%、(g) 45%、(h) 50% 激光清洗显微镜样貌图

Fig. 7 Microscopic morphology images of the surfaces cleaned by lasers with a pulse width of 200 ns, repetition frequency of 45 kHz, and (a) 15%, (b) 20%, (c) 25%, (d) 30%, (e) 35%, (f) 40%, (g) 45%, (h) 50% of the maximum power

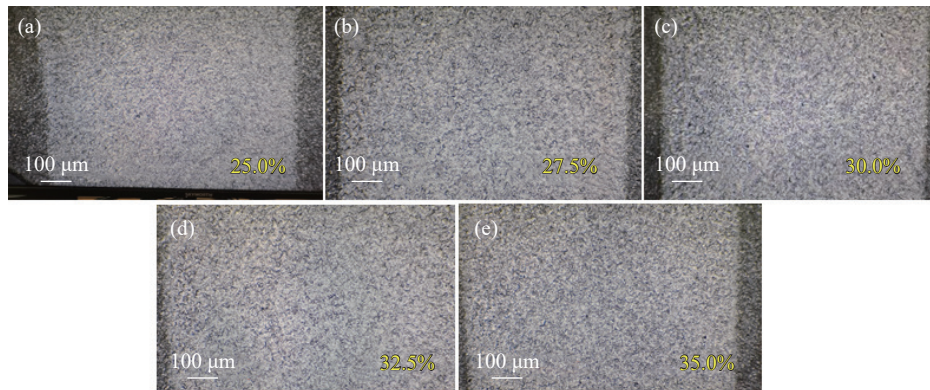


图 8 脉宽 200 ns、重频 45 kHz 时, 功率分别为最大功率的 (a) 25%、(b) 27.5%、(c) 30%、(d) 32.5%、(e) 35% 对应的激光清洗显微镜样貌

Fig. 8 Microscopic morphology of the surfaces cleaned by lasers with a pulse width of 200 ns, a repetition frequency of 45 kHz, and powers of (a) 25%, (b) 27.5%, (c) 30%, (d) 32.5%, (e) 35% of the maximum power

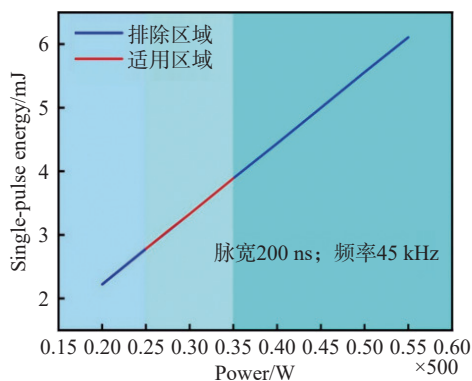


图 9 脉宽为 200 ns, 重频为 45 kHz 时, 单脉冲能量最佳范围

Fig. 9 Optimal single-pulse energy ranges at a pulse width of 200 ns and a repetition rate of 45 kHz

在脉冲能量固定的前提下, 脉宽与峰值功率

成反比<sup>[15]</sup>, 长脉宽、低峰值功率的激光光束照射到基材表面时, 瞬时温度降低, 则可以保护基材免受损伤。此外, 实验还发现, 随着功率的增加, 清洗效果逐渐显著, 但当功率超过一定阈值时, 基材会出现损伤。因此, 在实际应用中需严格控制激光参数, 以实现既能达到清洗效果, 又保护基材的最佳平衡。在本实验中, 最佳清洗效果对应一个“最优占空比窗口”。虽然两组实验的脉宽和频率不同, 但计算出的最佳占空比却非常接近 (0.81% 和 0.90%)。这表明, 对于该特定材料和污染物, 存在一个最佳的、由占空比决定的能量输入速率窗口。在这个窗口内, 能量输入足以有效破除污染物(例如通过烧蚀、振动、相爆炸等机制), 同时又不会过快导致基材过热损伤。

接下来,选取清洗效果最佳时的功率和脉宽,使它们固定不变,通过改变重复频率进一步优化清洗效果。固定激光脉宽和功率分别为 150 ns、175 W(35%),重复频率分别为 24 kHz、34 kHz、44 kHz、54 kHz、64 kHz、74 kHz。显微镜图像显示在重复频率为 54 kHz 时,获得了最佳清洗效果,如图 10(彩图见期刊电子版)所示。最后,

固定脉宽和功率分别为 200 ns、175 W(35%),重复频率分别为 15 kHz、25 kHz、35 kHz、45 kHz、55 kHz、65 kHz。显微镜图像显示在重复频率为 45 kHz 时清洗效果最佳,如图 11(彩图见期刊电子版)所示。下面将讨论脉宽与最佳重复频率的负相关性,权衡能量效率与清洗效果以及参数敏感性与优化方向。

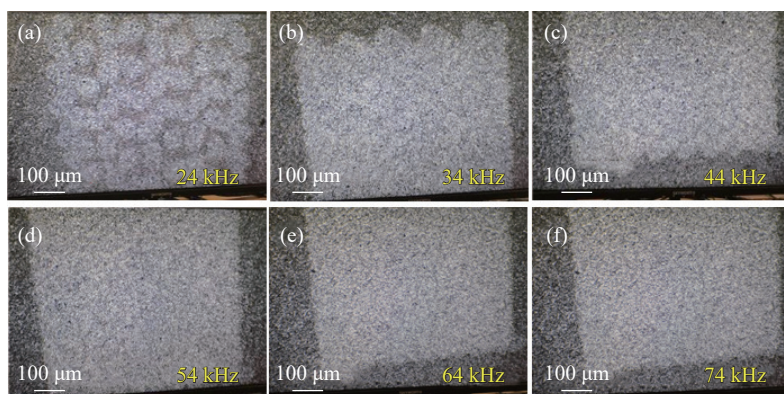


图 10 脉宽 150 ns 和功率 175 W (35%), 重复频率分别为 24 kHz、34 kHz、44 kHz、54 kHz、64 kHz、74 kHz 时激光清洗显微镜样貌图

Fig. 10 Microscopic images of the surfaces cleaned by lasers with a pulse width of 150 ns and a power of 175 W (35%), and repetition frequencies of 24 kHz, 34 kHz, 44 kHz, 54 kHz, 64 kHz, and 74 kHz

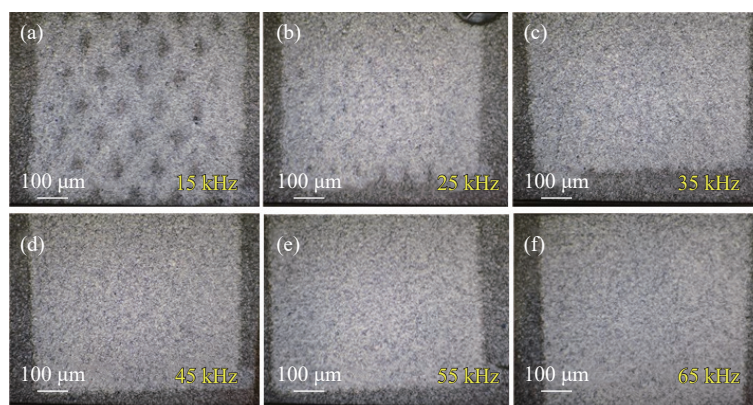


图 11 脉宽 200 ns 和功率 175 W (35%), 重复频率分别为 15 kHz、25 kHz、35 kHz、45 kHz、55 kHz、65 kHz 激光清洗显微镜样貌图

Fig. 11 Microscopic morphology images of the surfaces cleaned by lasers with a pulse width of 200 ns, a power of 175 W (35%), and repetition frequencies of 15 kHz, 25 kHz, 35 kHz, 45 kHz, 55 kHz, 65 kHz

#### (1) 脉宽与最佳重复频率的负相关性

当脉宽从 150 ns 增加至 200 ns (+33%), 最佳重复频率从 54 kHz 下降至 45 kHz (17%)。潜在原因是脉宽增加会导致单脉冲能量或作用时间延长, 这可能引发热积累效应, 需降低重复频率, 以避免材料损伤。占空比(脉宽×频率)的平衡: 第一组:  $150 \text{ ns} \times 54 \text{ kHz} = 0.81\%$ ; 第二组:  $200 \text{ ns} \times 45 \text{ kHz} =$

$0.90\%$ , 两组占空比接近, 但第二组略高, 需通过降低频率控制热输入。

#### (2) 能量效率与清洗效果的权衡

与 150 ns 脉宽相比, 较长脉宽 (200 ns) 下的单脉冲能量更高, 可能提升单次清洗效率, 但需降低频率以控制总能量输入。较短脉宽 150 ns 允许更高频率运行 (54 kHz), 适合对热敏感材料进

行快速清洗。

### (3) 参数敏感性与优化方向

激光脉宽对重复频率的调节更敏感:脉宽增加 33% 时导致最佳频率下降 17%。功率固定时,脉宽和频率需协同优化,即长脉宽需低重频,短脉宽可适配高重频。因此,脉宽与重复频率需反向调节以实现能量平衡,从而避免热损伤或清洗不足。占空比作为关键指标,建议控制在 0.8%~1.0% 范围内(基于当前实验)。实际应用建议对于热敏感材料优先选择短脉宽(150 ns)与高频率(54 kHz)组合,减少热影响;对高硬度/厚污渍材料,采用长脉宽(200 ns)与中低频(45 kHz)组合,提升单脉冲作用强度。

## 4 结 论

通过将掺钕激光器输出的高斯光束整形为平顶光束,并做能量仿真分析,采用单一变量优化激光清洗最佳参数和影响因素,进行芯片封装模具表面清洗实验,实验结果表明:

(1)在脉冲宽度为 150 ns、重复频率为 54 kHz、能量密度为 0.65 J/cm<sup>2</sup>(功率 35%, 175 W)的参数

组合下,激光清洗效果最佳,芯片封装模具表面无残留且基材无损伤,清洗后表面透亮程度与无污染基材一致。以上清洗效果与脉冲宽度为 200 ns、重复频率为 45 kHz、能量密度为 0.66 J/cm<sup>2</sup>(功率 30%, 150 W)条件下的清洗效果一致。

(2)在平均功率固定为最大功率的 35% 时,激光脉宽与重复频率的协同优化将显著影响清洗效果。通过优化激光参数,激光清洗技术能够高效去除模具表面污染物,且不会对基材造成损伤。实验表明,若要脉宽增加需适当降低频率以平衡热输入,而最佳占空比可能趋近于 0.9%。

(3)根据脉宽与峰值功率成反比的关系知,当脉宽增大时,峰值功率降低,激光束照射到基材表面的瞬时温度将会降低,从而对基材起到保护作用,因此在允许范围内,脉宽将取最小值。

(4)为了彻底清除模具污染物,提高清洗效率,同时不损伤模具表面,通过多次实验并且对比清洗效果,最终选用的扫描间距为 0.0800 mm,扫描速度为 7000 mm/s。此时清洗效果最佳。

该技术为芯片封装行业提供了一种高精度、高效率、低成本的绿色清洗解决方案,具有广阔的应用前景。

### 参考文献:

- [1] 张自豪,余晓畅,王英,等. 脉冲 YAG 激光清洗轮胎模具的实验研究[J]. *激光技术*, 2018, 42(1): 127-130.  
ZHANG Z H, YU X C, WANG Y, *et al.*. Experimental study about cleaning of tire molds with pulse YAG laser[J]. *Laser Technology*, 2018, 42(1): 127-130. (in Chinese).
- [2] YANG H, LIU H X, GAO R X, *et al.*. Numerical simulation of paint stripping on CFRP by pulsed laser[J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 145: 107450.
- [3] ASMUS J F, MURPHY C G, MUNK W H. Studies on the interaction of laser radiation with art artifacts[C]. *Proceedings of SPIE 0041, Developments in laser Technology II*, SPIE, 1974: 19-30.
- [4] ZHOU ZH H, SUN W P, WU J J, *et al.*. The fundamental mechanisms of laser cleaning technology and its typical applications in industry[J]. *Processes*, 2023, 11(5): 1445.
- [5] LEI Z L, TIAN Z, CHEN Y B. Laser cleaning technology in industrial fields[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(3): 030005.
- [6] 王宏睿. 激光清洗原理与应用研究[J]. *清洗世界*, 2006, 22(9): 20-23.  
WANG H R. Principle and applied research on laser cleaning[J]. *Cleaning World*, 2006, 22(9): 20-23. (in Chinese).
- [7] STEEN W M, MAZUMDER J. Laser cleaning[M]//STEEN W M, MAZUMDER J. *Laser Material Processing*. London: Springer, 2010: 417-440.
- [8] 林乔,石敏球,张欣,等. 激光清洗及其应用进展[J]. *广州化工*, 2010, 38(6): 23-25.  
LIN Q, SHI M Q, ZHANG X, *et al.*. Laser cleaning and its applications[J]. *Guangzhou Chemical Industry*, 2010, 38(6): 23-25. (in Chinese).
- [9] SCHAWLOW A L. Lasers: the intense, monochromatic, coherent light from these new sources shows many unfamiliar properties[J]. *Science*, 1965, 149(3679): 13-22.
- [10] ZHOU K, SANG S G, WANG C Y, *et al.*. Principle, application and development trend of laser cleaning[J]. *Journal of*

- Physics: Conference Series*, 2022, 2383(1): 012075.
- [11] 李浩宇, 杨峰, 郭嘉伟, 等. 激光清洗的发展现状与前景[J]. 激光技术, 2021, 45(5): 654-661.  
LI H Y, YANG F, GUO J W, *et al.*. Development status and prospect of laser cleaning[J]. *Laser Technology*, 2021, 45(5): 654-661. (in Chinese).
- [12] ZHAO H CH, QIAO Y L, DU X, *et al.*. Laser cleaning performance and mechanism in stripping of Polyacrylate resin paint[J]. *Applied Physics A*, 2020, 126(5): 360.
- [13] 刘锴, 范卫星, 王平秋, 等. 激光等离子体法清洗微纳颗粒的物态变化研究[J]. 激光技术, 2021, 45(4): 405-410.  
LIU K, FAN W X, WANG P Q, *et al.*. Study on the state change characteristics of cleaning micro-nano particles by laser plasma method[J]. *Laser Technology*, 2021, 45(4): 405-410. (in Chinese).
- [14] BEDAIR S M, SMITH H P. Atomically clean surfaces by pulsed laser bombardment[J]. *Journal of Applied Physics*, 1969, 40(12): 4776-4781.
- [15] ZHU G D, WANG SH R, CHENG W, *et al.*. Corrosion and wear performance of aircraft skin after laser cleaning[J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 132: 106475.
- [16] WANG S R, ZHANG M Y, *et al.*. Application of laser cleaning in postwelding treatment of aluminum alloy[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(34): 10967-10972.
- [17] ZHU G D, WANG S R, CHENG W, *et al.*. Investigation on the surface properties of 5A12 aluminum alloy after Nd: YAG laser cleaning[J]. *Coatings*, 2019, 9(9): 578-593.
- [18] 朱国栋, 王守仁, 成巍, 等. 激光清洗在金属表面处理中的应用研究进展[J]. 山东科学, 2019, 32(4): 38-45,73.  
ZHU G D, WANG SH R, CHENG W, *et al.*. Advances in the application of laser cleaning to metal surface treatment[J]. *Shandong Science*, 2019, 32(4): 38-45,73. (in Chinese).
- [19] 谭东晖, 陆冬生, 宋文栋, 等. 准分子激光直接清洗硅片上油脂的实验研究[J]. 激光技术, 1995, 19(5): 319-320.  
TAN D H, LU D SH, SONG W D, *et al.*. Experiment studies of excimer laser cleaning of grease-contaminated Si substrate[J]. *Laser Technology*, 1995, 19(5): 319-320. (in Chinese).
- [20] 谭东晖, 陆冬生, 宋文栋, 等. 激光清洗基片表面温度的有限元分析及讨论[J]. 华中理工大学学报, 1996, 24(6): 50-53.  
TAN D H, LU D S, SONG W D, *et al.*. A finite element analysis of the temperature distribution on a substrate surface during laser cleaning[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology*, 1996, 24(6): 50-53. (in Chinese).
- [21] 王泽敏, 曾晓雁, 黄维玲. 脉冲激光除漆机理及工艺参数的研究[J]. 材料保护, 2000, 33(4): 21-22,59.  
WANG Z M, ZENG X Y, HUANG W L. Parameters and mechanisms of paintcoat laser cleaning[J]. *Materials Protection*, 2000, 33(4): 21-22,59. (in Chinese).
- [22] 史兴宽, 徐传义, 任敬心, 等. 光学基片表面镀金薄膜的激光清洗阈值和损伤阈值[J]. 航空制造技术, 2000(5): 34-36.  
SHI X K, XU CH Y, REN J X, *et al.*. Laser cleaning threshold and damage threshold of gold-plating thin film on optical substrate surface[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2000(5): 34-36. (in Chinese).
- [23] 邹涛, 杨和逸, 仇连波. 活络模激光清洗技术的开发应用及发展方向[J]. 橡塑技术与装备, 2023, 49(3): 5-13.  
ZOU T, YANG H Y, QIU L B. Development application and direction of laser cleaning technology for active mode[J]. *China Rubber/Plastics Technology and Equipment*, 2023, 49(3): 5-13. (in Chinese).
- [24] CUCCI C, DE PASCALE O, SENESI G S. Assessing laser cleaning of a limestone monument by fiber optics reflectance spectroscopy (FORS) and visible and near-infrared (VNIR) hyperspectral imaging (HSI)[J]. *Minerals*, 2020, 10(12): 1052.
- [25] GU J Y, SU X, JIN Y, *et al.*. Research progress and prospects of laser cleaning for CFRP: a review[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2024, 185: 108349.
- [26] WANG Y X, YU ZH H, YU L SH, *et al.*. Study on removal mechanism of TC4 oxide film by nanosecond pulsed laser cleaning in air environment[J]. *Optics & Laser Technology*, 2025, 181: 111856.
- [27] RAZAB M K A A, NOOR A M, JAAFAR M S, *et al.*. A review of incorporating Nd: YAG laser cleaning principal in automotive industry[J]. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 2018, 11(4): 393-402.
- [28] 张雨阳, 杨伟, 牛富增, 等. 纳秒激光对硅基底上的微纳颗粒的清洗研究[J]. 激光与红外, 2025, 55(9): 1406-1413.  
ZHANG Y Y, YANG W, NIU F Z, *et al.*. Nanosecond laser cleaning of micro particles on silicon substrates[J]. *Laser & Infrared*, 2025, 55(9): 1406-1413. (in Chinese).

- [29] WAN ZH, YANG X F, XIA G F, *et al.*. Effect of laser power on cleaning mechanism and surface properties[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(30): 9482-9490.
- [30] 陈玲, 王非森, 文申柳, 等. 激光清洗对超低碳贝氏体钢腐蚀性能的影响[J/OL]. *应用激光*, 1-10 [2025-12-19].  
CHEN L, WANG F S, WEN SH L, *et al.*. Effect of Laser Cleaning on Mechanical Properties of Ultra-Low Carbon Bainitic Steel[J/OL]. *Applied Laser*, 1-10 [2025-12-19].
- [31] ANTONOPOULOU-ATHERA N, KALATHAKIS C, CHATZITHEODORIDIS E, *et al.*. Theoretical and experimental approach on laser cleaning of coins[J]. *SN Applied Sciences*, 2019, 1(3): 238.
- [32] PELOSI C, FODARO D, SFORZINI L, *et al.*. Study of the laser cleaning on plaster sculptures. The effect of laser irradiation on the surfaces[J]. *Optics and Spectroscopy*, 2013, 114(6): 917-928.
- [33] 王伟, 王蔚, 姚天昊, 等. 激光去除碳纤维复合材料表面树脂工艺试验及胶接性能研究[J]. *红外与激光工程*, 2025, 54(6): 182-194.  
WANG W, WANG W, YAO T H, *et al.*. Experimental study on laser removal of surface resin in carbon fiber composites and adhesive bonding performance[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2025, 54(6): 182-194. (in Chinese).
- [34] RAUH B, KRELING S, KOLB M, *et al.*. UV-laser cleaning and surface characterization of an aerospace carbon fibre reinforced polymer[J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2018, 82: 50-59.
- [35] 李晨毓, 胡文哲, 张雪雁, 等. 双波长纳秒激光清洗技术在大理石文物上的应用[J]. *中国光学(中英文)*, 2024, 17(5): 1050-1059.  
LI C L, HU W ZH, ZHANG X Y. Application of dual-wavelength nanosecond laser cleaning technology on stone artifacts[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(5): 1050-1059. (in Chinese).
- [36] 葛春晖, 刘妍君, 年福东, 等. 基于半监督度量学习的激光诱导击穿光谱检测白芍中的重金属含量[J]. *分析化学*, 2024, 53(4): 1254-1265. .  
GE C H, LIU Y J, CHEN M S, *et al.*. Prediction of Wind Turbine Lubricating Oil's Acid Value by Ordinary Least Square Method Based on Attenuated Total Reflectance-Fourier Transform Infrared Spectroscopy Through Higher-Order Derivative Combined with Angular Metric[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2024, 53(4): 1254-1265. (in Chinese).

#### 作者简介:



杨金芳(1992—),女,甘肃天水人,博士,副教授,硕士生导师,西安电子科技大学博士,主要从事近-中红外全固态锁模激光振荡器、飞秒光学参量振荡器及激光清洗方面研究。E-mail: [jfyang1314@163.com](mailto:jfyang1314@163.com)



令维军(1968—),男,甘肃天水人,博士,教授,博士生导师,2005年于中国科学院物理研究所获得博士学位,主要从事超短激光脉冲产生及放大方面的研究。E-mail: [wjlings@sina.com](mailto:wjlings@sina.com)