

·结构与工艺·

Nd:YAG 脉冲激光清洗技术研究

李鸿鹏¹, 郭宝录²

(1. 中国电子科技集团公司光电研究院, 天津 300308 2. 空军驻锦州地区军事代表室, 辽宁 锦州 121000)

摘要 激光清洗技术是近 10 年来发展的一种新型清洗技术, 它以自身的优势在许多领域中逐步取代了传统清洗工艺。脉冲式的 Nd:YAG 激光清洗的过程依赖于激光器所产生的光脉冲的特性, 基于由高强度的光束、短脉冲激光及污染层之间的相互作用所导致的光物理反应, 介绍了 Nd:YAG 激光器的基本原理及分类, 着重对激光清洗原理进行了分析。还介绍了用 Nd:YAG 激光器进行的清洗实验。结果表明, 用 Nd:YAG 激光器清洗光滑基底表面污粒具有很好的效果, 是今后清洗技术发展的一个方向。

关键词 Nd:YAG 激光器; 激光清洗; 附着力; 脱漆

中图分类号: TN248

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2018)-02-0063-05

Research on Nd:YAG Pulse Laser Cleaning Technology

LI Hong-peng¹, GUO Bao-lu²

(1. Academy of Opto-Electronics, China Electronics Technology Group Corporation (AOE CETC), Tianjin 300308, China;

2. Military Representative Office of Air Force in Jinzhou, Jinzhou 121000, China)

Abstract: Laser cleaning technology is a new rapidly developing cleaning technology in recent ten years. With its advantages, it has gradually replaced traditional cleaning technologies in many fields. The pulsed Nd:YAG laser cleaning process depends on laser pulse characteristics generated by lasers. Based on the photophysical reaction caused by the interaction among high intensity beam, short pulse laser and pollution layers, the basic principle and classification of Nd:YAG laser are introduced, and the principle of laser cleaning is imposed. The Nd:YAG laser cleaning experiment is also introduced. Experimental results show that Nd:YAG laser cleaning has good effect on cleaning the surface of smooth substrate, which is a developing direction of cleaning technology in the future.

Key words: Nd:YAG laser; laser cleaning; adhesion; paint stripping

自从 20 世纪 60 年代第一台激光器产生以来, 具有相干性好、发散角小、能量高度集中等特点的激光在各个领域都得到了广泛的应用, 比如激光测距、激光加工、激光通讯等。到了 20 世纪 80 年代, 人们发现把高能量的激光束聚焦后照射一些物品的被污染的部位, 使被照射的物质发生振动、熔化、蒸发、燃烧等一系列复杂的物理化学过程, 可以使污染物最终脱离物品表面, 从而实现对表面污染物的清除, 这就是激光清洗。此后十几年来, 激光清洗已经从实验室内走向了实际应用, 用于油污、锈

蚀的去除、文物、微电子线路板等各种材料的清洗, 并取得了很好的经济和社会效益。

1 激光清洗的物理原理

脉冲式的 Nd:YAG 激光清洗的过程依赖于激光器所产生的光脉冲的特性, 基于由高强度的光束、短脉冲激光及污染层之间的相互作用所导致的光物理反应。其物理原理可概括如下:

(1) 激光器发射的光束被需处理表面上的污染

层所吸收;

(2)大能量的吸收形成急剧膨胀的等离子体(高度电离的不稳定气体),产生冲击波;

(3)冲击波使污染物变成碎片并被剔除^[1];

(4)光脉冲宽度必须足够短,以避免使被处理表面遭到破坏的热积累;

(5)实验表明,当金属表面上有氧化物时,等离子体产生于金属表面^[7];

(6)等离子体只在能量密度高于阈值的情况下产生,这个阈值取决于被去除的污染层或氧化层。这个阈值效应对在保证基底材料安全的情况下进行有效清洁非常重要。等离子体的出现还存在第二个阈值。如果能量密度超过这一阈值,则基底材料将被破坏。为在保证基底材料安全的前提下进行有效的清洁,必须根据情况调整激光参数,使光脉冲的能量密度严格处于两个阈值之间^[5]。每个激光脉冲去除一定厚度的污染层。如果污染层比较厚,则需要多个脉冲进行清洗。将表面清洗干净所需要的脉冲数量取决于表面污染程度。由两个阈值产生的一个重要结果是清洗的自控性。能量密度高于第一阈值的光脉冲将一直剔除污染物,直到达到基底材料为止。又因为其能量密度低于基底材料的破坏阈值,所以基底不会受到破坏。

2 Nd:YAG 激光清洗器特点

2.1 清洗特点

(1)它属于四能级系统,量子效率高,受激辐射界面大,阈值远远低于红宝石和钕玻璃;

(2)具有良好的热稳定性能,热导率高,热膨胀系数小,适用于脉冲、连续、高重复率等多种器件,是目前能在室温下连续工作的、唯一实用的固体工作物质;

(3)YAG 晶体各向同性,硬度大,化学性能稳定,易于制成高稳定度要求的器件。它已成为当前应用最为广泛的主要固体工作物质;

(4)Nd:YAG 器件已广泛用于材料加工。除了在激光打孔、焊接、热处理、打标、书写、动平衡等加工中应用外,它还能在微细加工领域获得广泛应用。尤其是大规模集成电路的加工,已显示出它独有的优越性^[6]。

2.2 清洗机理分析

基体对激光强吸收而颗粒透明或弱吸收时,基体瞬时受热快速膨胀,吸附在基体表面的颗粒获得一定的速度和加速度,脉冲过后,基体快速冷却收缩,颗粒由于惯性脱离基体表面。在能量密度均匀的脉冲激光辐照下,基体表面温度升高可近似按下式计算

$$\Delta T = (1 - R)F / \rho c \mu \quad (1)$$

式中, R 为基体表面对激光的反射率; F 为激光能量密度; ρ 、 c 分别为基体的密度、比热容; μ 为基体在脉冲过程中的热扩散长度^[8]。

基体表面由温度升高而引起的法向热膨胀量为

$$H = \alpha \mu \Delta T = (1 - R)F \alpha / \rho c \quad (2)$$

式中, α 为材料的热膨胀系数。代入代表性参数值: $F = 1 \text{ J/cm}^2$, $\alpha = 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, $\rho = 3 \text{ g/cm}^3$, $c = 0.4 \text{ J/(g K)}$, 得 $H \approx 10^{-6} \text{ cm}$ 。若激光脉冲宽度为 $\tau = 10 \text{ ns}$, 则颗粒获得的平均速度、加速度分别为: $v = H/\tau = 10^2 \text{ cm/s}$; $a = H/\tau^2 = 10^{10} \text{ cm/s}^2$ 。虽然热膨胀量很小,但因脉冲时间很短,颗粒获得的加速度可达 10^8 m/s^2 , 可将颗粒去除^[4]。

颗粒对激光强吸收而基体弱吸收时(见图 1b)。

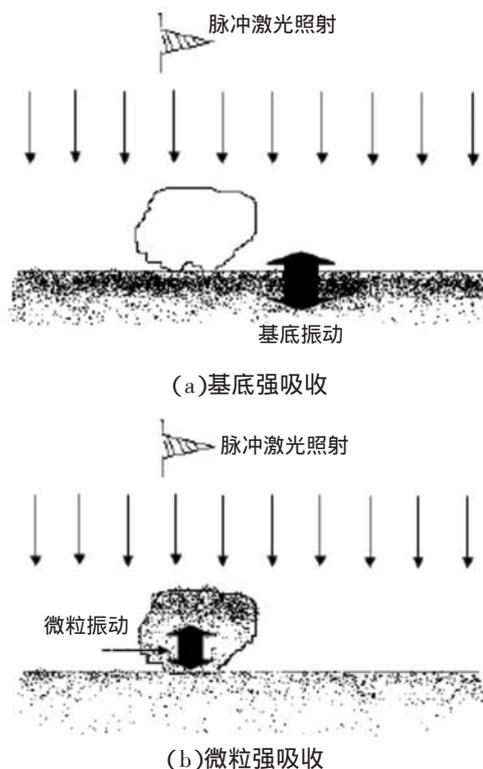


图1 干式激光清洗两种极端情况的图示:仅基底吸收和仅微粒吸收
(图中黑点的密度表明了因吸收脉冲激光而产生的热量)

在激光辐照下,颗粒吸收能量后快速升温,颗粒内的温度升高是不均匀的,离辐照表面越远,温度升高越小。温度的快速升高引起颗粒的快速热膨胀,附着力限制了颗粒的快速膨胀,在颗粒内引起热应力,其数值等于单位面积上的附着力,即 $\sigma(d,t) = -P = -F_v/\pi\delta^2$ ^[2],要清除颗粒,颗粒与基本接触处必须经历真实位移,根据应力应变关系得清洗条件为

$$\frac{\sigma(d,t)}{E} + \gamma\Delta T(d,t) = \varepsilon(d,t) > 0 \quad (3)$$

式中, σ 、 ε 、 ΔT 分别为 t 时刻,接触点颗粒表层的热应力、相对位移、升高的温度; E 为颗粒的弹性模量; γ 为颗粒的热膨胀系数。清洗条件也可写成: $f > P$, f 为单位面积上的清洗力, $f = \gamma E \Delta T(d,t)$ ^[10]。

3 使用Nd:YAG三倍频激光清洗镀膜的K9玻璃表面

3.1 实验内容

实验结合实际的某大型激光装置运行过程中出现的光学表面污染问题,在污染物的选择上,主要选用油脂作为实验中的污染物。在激光清洗实验之前,将对洁净的K9基片表面,以及附着了上述污染物的K9玻璃表面进行表征,所使用的仪器包括:光学显微镜、紫外—可见分光光度计、傅里叶变换红外光谱仪、表面张力测量仪,而在采用Nd:YAG激光器对这些样品照射之后,同样采用这些检测手段来表征基底表面的相关性质,以便于对比K9玻璃表面的污染物在激光作用前后的差别并确定清洗效果^[3]。

图2所示激光清洗装置适用于较小的清洗部件。

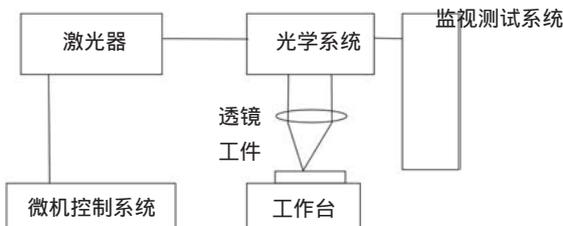


图2 激光清洗装置示意图

通过工作台可实现部件上不同部位的清洗。

对于笨重的物件或大型固定结构物的清洗,如除锈等,可通过激光束逐点平移和小角度往复偏转。在较远距离,如激光清洗装置示意图的待清洗物件上形成激光扫描,实现清洗。

激光清洗装置可由计算机控制激光能量、脉冲频率、作用时间以及工件的移动。监视系统可以远距离对清洗效果进行实时监测。

3.2 使用Nd:YAG三倍频激光清洗镀膜K9玻璃表面

(1)清洗前的检测结果

在对K9玻璃表面进行人为的污染之前和之后,有必要对洁净的基片和污染后的基片表面进行表征。这里选取3块超薄的K9玻璃,使用紫外—可见分光光度计、光学显微镜、FT-IR拉曼附件以及表面张力测量仪对分别它们进行测量^[9]。测量结果如图3所示。

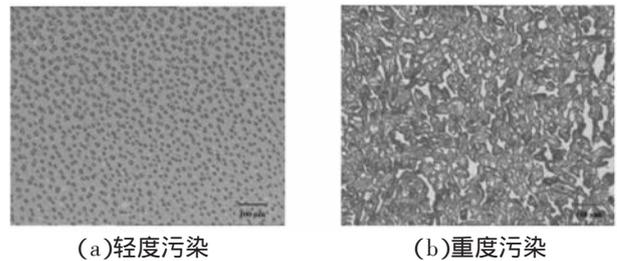


图3 不同污染程度的膜层表面的显微照片

①显微照片

②透过率

经过测量污染后的镀膜K9基片透过率比清洁前降低了40%。

(2)清洗的实验设置

①单点多脉冲方式

首先对污染后的基片表面进行阈值测量,具体方式是激光每次都作用于基片上同一点,逐渐增加脉冲能量,直到该点发生损伤。然后在该损伤点上方取7个点,分别采用不同的能量和脉冲个数进行清洗实验,阈值测量的结果显示,能量密度从低到高基片表面开始未出现损伤,当入射激光能量密度增大到阈值之后,基片表面产生了损伤,因此,清洗所用的激光能量密度不能大于这一损伤阈值。

②多脉冲扫描方式

在使用Nd:YAG三倍频激光照射膜层表面污染

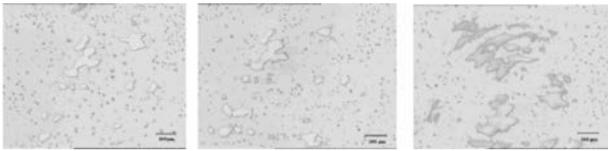
物时,在基片表面选取矩形作为激光扫描区域。

(3)实验结果

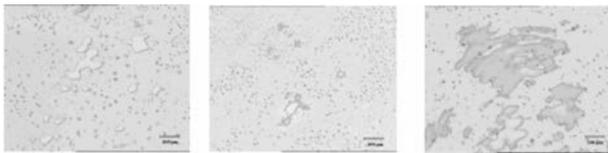
①单点多脉冲方式

显微照片

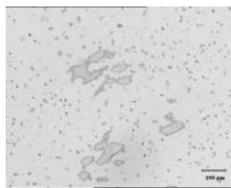
图4中的小黑点为污染物微粒。



(a)相同能量下 增大脉冲



(b)相同脉冲下 增大能量



(c)低能量多次脉冲

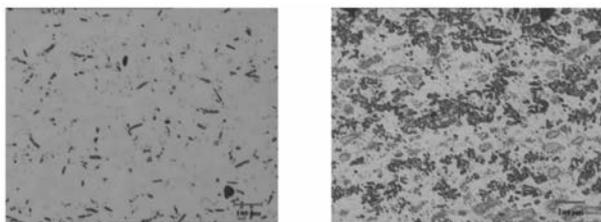
图4 已污染膜层在不同脉冲及能量的三倍频激光作用下的显微图片

对比各幅图片可以发现,当同等能量照射下,脉冲数越多,污染物面积越少;而在相同脉冲数下,照射能量越高,污染物面积越少。低能量、多次脉冲与高能量、一次脉冲可以达到相同的清洗效果。

②多脉冲扫描方式

显微照片

不同污染程度的膜层表面在三倍频激光作用下的显微图片如图5所示。



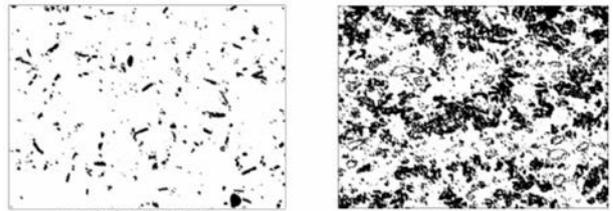
(a)轻度污染

(b)重度污染

图5 不同污染程度的膜层表面在三倍频激光作用下的显微图片

从图5可以发现,三倍频光对轻度和重度污染

后的膜层表面均能够产生清洗效果。二值化后的图片如图6所示。



(c)轻度污染 清洗后

(b)重度污染清洗后

图6 不同污染程度的镀膜基片在照射前后的二值图片

结合图片可以发现,对油脂这种污染物,不管是轻度污染还是重度污染,Nd:YAG三倍频激光都能够产生清洗效果,不过Nd:YAG三倍频激光对真空硅脂所造成的轻度污染的清洗效率要高于其造成的重度污染。

3.3 实验结论

使用Nd:YAG三倍频激光照射被污染的化学膜层,在同等能量照射下,脉冲数越多,污染物面积越少;而在相同脉冲数下,照射能量越高,污染物面积越少。低能量、多次脉冲与高能量、一次脉冲可以达到相同的清洗效果。

4 结 论

介绍了用Nd:YAG激光器进行油脂的清洗实验。微米、亚微米级细微颗粒的去除是半导体、微电子、微型机械、精密光学等高新技术中的关键问题。细微颗粒与基体表面之间强大的附着力使常规去除方法难以奏效,短脉冲激光能有效清除微米、亚微米级细微颗粒。

激光清洗系统虽然前期一次性投入较高,但清洗系统可以长期稳定使用,运行成本低,更重要的是,可以实现自动化操作。它以自身的优势和不可替代性在许多领域中逐步取代了传统清洗工艺。随着科学技术的高速发展,激光清洗技术会越来越多地应用于人们的生产和生活中的各个领域。

我国在这方面的研究刚刚开展,目前虽然还难以详细估计激光清洗技术的应用市场份额,但上述领域不少属于国民经济的支柱产业,激光清洗技术渗入其中后,产生的经济效益和社会效益是十分可观的。利用我国现有的激光技术条件,开发配套的

激光清洗设备,并使其在短时间内实用化、产业化是完全可能的,对推动高新技术产业的发展本身亦具有重要而深远的意义。

参考文献

- [1] 李薇薇.微电子器件硅衬底表面污染物去除技术的研究[D].天津:河北工业大学,2003.
- [2] 卞保民,杨玲,陈笑,等.激光等离子体及点爆炸空气冲击波波前运动方程的研究[J].物理学报,2002,51(4):809-813.
- [3] 卞保民,陈建平,杨玲,等.空气中激光等离子体冲击波的传输特性研究[J].物理学报,2000,49(3):445.
- [4] 李维新.一维不定常流与冲击波[M].北京:国防工业出版社,2004,330-343.
- [5] 宋峰,伍雁雄,刘淑静.激光清洗的发展历程[J].清洗世界,2005,21(6):37-40.
- [6] 闰志瑞.半导体硅片清洗工艺发展方向[J].电子工业专用设备,2004(116):23-26.
- [7] 卞保民,侯风,陈建平,等.激光等离子体空气冲击波前参量的测定及研究[J].中国激光,2001,28(2):155-159.
- [8] 古海云.ULSI硅单晶衬底片表面吸附颗粒机理及去除技术研究[D].天津:河北工业大学,2001.
- [9] 张厥宗.硅单晶抛光片的加工技术[M].北京:化学工业出版社,2005.
- [10] 梁治齐.实用清洗技术手册[M].北京:化学工业出版社,2005,30-32.

《光电技术应用》编辑部征稿通知

《光电技术应用》期刊是中国电子科技集团公司主管,中国电子科技集团公司光电研究院主办,公开发行的学术性中文科技期刊。以光电技术为主要专业特色,传播光电技术、光电系统应用技术专业领域的先进科技信息,报道新型科技成果,推动工程技术交流,促进行业科技进步与发展。

本刊征集具有创新性的未曾公开发表过的光电技术最新研究成果。所设栏目主要有:综述,光电系统,光学设计,红外技术,激光技术,光电探测,光电器件与材料,信号与信息处理,电路与控制,测试、试验与仿真等。

来稿应内容新颖,论点明确,论据充分,数据可靠,文字精炼,用词规范。每篇文章以6000字为限。论文应含中文与英文的文章题目(20字之内)、作者姓名、作者所在单位的对外名称、单位所在省、市、邮政编码、摘要、关键词(3~8个)。

期刊拥有优秀的编委会成员,审稿专家涉及光电技术的各个领域,具有审稿速度快、质量高,编辑人员具有较高的职业素质,工作认真负责、反馈速度快,期刊版面设计合理、美观大方,印刷质量好,出刊及时。对于优秀论文可以减收或不收版面费。

编辑部通信地址:天津市空港经济区纬五道9号;邮政编码:300308;联系电话:022-59067938;联系人:朱编辑 牛编辑;投稿邮箱:aoe-cetc@vip.163.com。

《光电技术应用》编辑部