

文章编号: 1001-3806(2007)03-0301-05

## 短脉冲激光清洗细微颗粒的研究进展

陈菊芳<sup>1,2</sup>, 张永康<sup>\*</sup>, 孔德军<sup>1</sup>, 叶霞<sup>1,2</sup>

(1. 江苏大学 机械工程学院, 镇江 212013; 2. 江苏技术师范学院 机械与汽车工程学院, 常州 213001)

**摘要:** 综述了短脉冲激光清洗细微颗粒技术的研究进展状况, 介绍了其研究背景和基本理论模型; 阐述了它的应用成果, 包括短脉冲激光清洗细微颗粒的“干式”清洗技术和“液膜”清洗技术; 总结了该技术对细微颗粒清洗效果的影响因素及规律; 并展望了该技术今后的发展方向。

**关键词:** 激光技术; 激光清洗; 细微颗粒; 短脉冲激光; 综述

**中图分类号:** TN 249 **文献标识码:** A

### Research progress of cleaning tiny particles by short-pulsed laser

CHEN Ju-fang<sup>1,2</sup>, ZHANG Yong-kang<sup>1</sup>, KONG De-jun<sup>1</sup>, YE Xia<sup>1,2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 2. School of Mechanical and Automobile Engineering, Jiangsu Teachers University of Technology, Changzhou 213001, China)

**Abstract** The development of cleaning tiny particle technology by short-pulsed laser is reviewed. At first its research background and basic theoretical model are introduced. Then its applications such as the dry laser cleaning and the steam laser cleaning are described and the influence factors on the cleaning effect are summed up. Finally some predictions of its future development are presented.

**Key words** laser technique; laser cleaning; tiny particle; short-pulsed laser; summary

## 引 言

细微颗粒会造成超大规模集成电路、微型高密度存储设备短路或性能大大降低, 使微型机械表面产生划痕甚至裂纹等致命损伤, 极大地降低精密光学设备的分辨率, 是半导体、微电子、微型机械、精密光学等高新技术中需要迫切解决的问题。随着半导体和微电子设备尺寸越来越小, 需要去除的颗粒也越来越小, 目前需去除的颗粒已达微米、亚微米级<sup>[1,2]</sup>。由于细微颗粒与基体表面之间存在强大的附着力, 随着颗粒尺寸的减小, 去除颗粒所需的加速度越来越大, 对直径为 1 $\mu$ m 的颗粒, 其数值一般超过重力加速度的  $10^7$  倍<sup>[2]</sup>, 去除变得非常困难, 这对清洗技术提出了更高的要求。传统清洗方法, 如机械洗刷、化学清洗和超声清洗等, 对清除微米、亚微米级颗粒显得力不从心。同时, 机械洗刷容易损伤基体表面, 化学、超声清洗常常引入有毒的化学物质, 而且传统清洗方法一般都需要消耗大量水资源。近年来, 国际上发展的短脉冲激光清洗可以有效去除微米、亚微米级颗粒, 不但效率高, 而且具有

不污染环境, 几乎不消耗水源, 便于自动控制等优点。

根据清洗时是否有能量传输介质液体存在, 可将激光清洗分为“干式”和“液膜”激光清洗。干式激光清洗, 利用激光直接辐照基体表面, 基体或颗粒受热瞬时膨胀产生巨大的反弹力去除颗粒。液膜激光清洗, 先在基体表面沉积一层微薄液体, 随后用短脉冲激光辐照。激光直接加热液体或基体吸收激光能量后将热量传递给液体, 部分液体层温度急剧增高发生爆发沸腾, 大量气泡成核并迅速长大产生压力波将颗粒去除。

### 1 附着力

一般, 细微颗粒在基体表面的附着力主要有 3 种, 即范德瓦尔斯力、毛细力和静电力。

#### 1.1 范德瓦尔斯力

干表面上, 当颗粒尺寸小于几微米时, 颗粒与基体表面的范德瓦尔斯力成了主要的附着力<sup>[3,4]</sup>:  $F_v = \frac{hr}{8\pi z^2} + \frac{h\delta^3}{8\pi z^3}$ , 式中,  $h$  为与材料有关的列弗西兹-范德瓦尔斯常数,  $r$  为颗粒半径 (见图 1a),  $z$  为颗粒和基体间的原子间隙,  $\delta$  为颗粒与基体接触面的半径。

#### 1.2 毛细力

基体表面潮湿时, 颗粒与基体之间微小空隙处积

作者简介: 陈菊芳 (1971-), 女, 副教授, 博士研究生, 现主要从事激光清洗的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: ykzhang@ujs.edu.cn

收稿日期: 2006-03-31; 收到修改稿日期: 2006-05-16

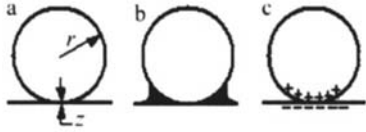


图 1 基体上细微颗粒的主要附着力

聚了很薄的液体层(见图 1b),液体层在颗粒和基体之间产生的凝聚力就是毛细力,其大小为<sup>[3,4]</sup>:  $F_c = 4\pi\sigma r$ , 式中  $\sigma$  为液体的表面张力系数,  $r$  为颗粒半径。

### 1.3 静电力

颗粒与基体之间由于出现电荷的输送而使两者带有异号电荷,因而有相互吸引的双层静电力存在(见图 1c),可按下式计算<sup>[3,4]</sup>:  $F_e = (\pi\epsilon U^2 r)/z$ , 式中,  $\epsilon$  为介电常数,  $U$  为接触电势,  $r$  为颗粒半径,  $z$  为颗粒与基体之间的微观间隙。

由上面计算知,附着力与颗粒的尺寸有关,  $F \propto r$ , 颗粒质量  $m \propto r^3$ , 由牛顿第二定律  $a = F/m$ , 所以  $a \propto r^{-2}$ 。颗粒尺寸越小,清除它所需的加速度越大,清除就越困难。

## 2 干式激光清洗

基体对激光强吸收而颗粒弱吸收,或基体弱吸收而颗粒强吸收,或基体与颗粒都强吸收时,都有较好的清洗效果<sup>[2~8]</sup>。

### 2.1 清洗机理分析

基体对激光强吸收而颗粒透明或弱吸收时(见图 2a),基体瞬时受热快速膨胀,吸附在基体表面的颗粒

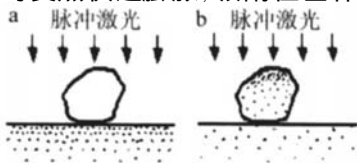


图 2 干式激光清洗

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<sup>[3]</sup>:  $\Delta T = (1-R)F/\rho c\mu$ , 式中,  $R$  为基体表面对激光的反射率;  $F$  为激光能量密度;  $\rho$ ,  $c$  分别为基体的密度、比热容;  $\mu$  为基体在脉冲过程中的热扩散长度。基体表面由温度升高而引起的法向热膨胀量为<sup>[3]</sup>:  $H = \alpha\mu\Delta T = (1-R)F\alpha/\rho c$ , 式中,  $\alpha$  为材料的热膨胀系数。代入代表性参数值:  $F = 1\text{J}/\text{cm}^2$ ,  $\alpha = 10^{-6}\text{K}^{-1}$ ,  $\rho = 3\text{g}/\text{cm}^3$ ,  $c = 0.4\text{J}/(\text{g}\cdot\text{K})$ , 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:  $v = H/\tau = 10^2\text{cm}/\text{s}$ ,  $a = H/\tau^2 = 10^{10}\text{cm}/\text{s}^2$ 。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  $10^8\text{m}/\text{s}^2$ , 可将颗粒去除。

颗粒对激光强吸收而基体弱吸收时(见图 2b),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<sup>[4]</sup>:  $\sigma(d, t) = -p = -F_c/\pi d^2$ , 要清除颗粒,颗粒与基体接触处必须经历真实位移,根据应力应变关系得清洗条件<sup>[4]</sup>:  $\frac{\sigma(d, t)}{E} +$

$\nu\Delta T(d, t) = \epsilon(d, t) > 0$ , 式中  $\sigma$ ,  $\epsilon$ ,  $\Delta T$  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,  $\nu$  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,  $f = \nu E \Delta T(d, t)$ 。

### 2.2 影响因素及规律

2.2.1 材料的影响 基体与颗粒的材料不同对激光的吸收率不同,从而影响清洗效果。基体强吸收颗粒透明或弱吸收时清洗效果很好。ZHENG<sup>[2]</sup>用波长 248nm 的激光,成功清除了 Si Ge N P 基体上  $1\mu\text{m}$  的透明颗粒  $\text{SO}_2$ 。FOURRIER<sup>[5]</sup>用波长 248nm 的激光,成功清除了聚酰胺 (polyimide, PI) 基体上的  $\text{SO}_2$  颗粒和聚苯乙烯 (polystyrene, PS) 颗粒。颗粒强吸收基体透明或弱吸收时,也有很好的清洗效果,但对材料有选择性。LU<sup>[4]</sup>采用波长 248nm 的激光,成功清除了石英基体上的 A 颗粒。KERRY<sup>[6]</sup>用波长  $1.06\mu\text{m}$ 、脉宽 20ns 能量密度为  $650\text{mJ}/\text{cm}^2$  的激光清洗锂基体上微米级的钨颗粒,100 个脉冲后清除率达 95%,而同样的激光参数对锂基体上橡胶颗粒的去除率却不足 5%。笔者认为这与材料性能有关,由前面分析知,单位面积上的清洗力  $f = \nu E \Delta T(d, t)$ , 与材料的弹性模量成正比,橡胶的弹性模量远小于钨。基体和颗粒透明或弱吸收时,则几乎没有清除效果,FOURRIER<sup>[5]</sup>用波长 248nm,对透明基体聚甲基丙烯酸甲酯 (polymethyl methacrylate, PMMA) 上的透明颗粒  $\text{SO}_2$  进行清洗,发现没有去除效果。

2.2.2 激光参数的影响 激光能量密度越大,基体或颗粒吸收的能量越多,清洗效率越高。LU, SONG 和 DOBLER 等人<sup>[4,7~9]</sup>的研究表明,激光清洗时具有清洗与损伤阈值。能量密度低于清洗阈值时,没有清洗效果;能量密度高于清洗阈值后,随着激光能量密度的增加,清洗率不断增加;而能量密度高于损伤阈值时,基体产生损伤。因此,为避免基体损伤,应将能量密度控制在清洗与损伤阈值之间。

激光波长影响基体、颗粒对激光的吸收率,从而影响去除效果。如 PMMA 对波长 248nm 的激光透明,用它清洗 PMMA 上的透明颗粒  $\text{SO}_2$  没有去除效果,而 PMMA 对波长 193nm 的激光的吸收率为  $2 \times 10^3\text{cm}^{-1}$ ,

能量密度为  $25\text{mJ}/\text{cm}^2$  时, 20 个脉冲后 PMMA 上  $400\text{nm}$  的  $\text{SiO}_2$  颗粒的清除率达  $80\%$  [5]。SONG [8] 用波长为  $355\text{nm}$ ,  $532\text{nm}$ ,  $1064\text{nm}$  的激光, 研究了硅基体上硅树脂的去除行为, 研究表明波长为  $355\text{nm}$  的激光清洗效果最好,  $532\text{nm}$  的效果次之, 而  $1064\text{nm}$  的效果最差。一般, 波长越短, 材料对激光的吸收率越高, 清洗率越高 [10]。

激光脉冲宽度影响材料的热扩散长度及作用时间, 从而影响去除效果。DOBLER 等人 [9] 的研究表明颗粒获得的最大加速度与脉冲宽度的关系为:  $a_{\text{max}} \propto \tau^{-2}$ , 脉冲宽度越短颗粒获得的加速度越大, 颗粒越容易清除。同时脉冲宽度越短, 能量在表层积聚, 容易造成基体损伤 [11]。

FOURRIER 和 SONG 等人 [5, 8] 研究了脉冲次数对清洗效果的影响。脉冲次数增加清洗率增加, 但脉冲次数对清洗率有饱和性, 开始的脉冲清洗率较高, 脉冲达到一定数量后不再具有清洗效果。FOURRIER [5] 用波长为  $193\text{nm}$ , 能量密度为  $25\text{mJ}/\text{cm}^2$  的激光清洗 PMMA 表面  $400\text{nm}$  的  $\text{SiO}_2$  颗粒, 第 1 个脉冲清洗率达  $35\%$ , 5 个脉冲后清洗率达  $80\%$ , 继续增加脉冲次数至 20 个, 清洗率没有明显增加。

脉冲重复频率对清洗效果影响不大。LU [12] 的理论计算表明, 在脉冲宽度为几十纳秒的激光辐照下, 材料快速升温后又快速降温, 几百纳秒后材料温度降至室温, 时间远小于一般的脉冲间隔。LU [4] 认为, 清洗效果不受脉冲重复频率的影响。

2.2.3 激光入射角的影响 虽然短脉冲激光能有效清除细微颗粒, 但由于激光光斑尺寸较小, 使清洗速度相对较低, 而且激光对基体的过度辐照将引起基体的损伤, LEE 和 VEREECKE 等人 [13, 14] 的研究表明激光斜角入射时, 清洗速度更高, 且对基体的损伤大大降低, 甚至没有损伤。激光垂直入射时, 若颗粒对激光不透明, 微粒正下方的表面被遮住, 不能接受激光的直接照射, 而斜角入射时, 激光束直接照射微粒的正下方 (见图 3), 恰在微粒和基体的界面处发挥作用, 清洁效

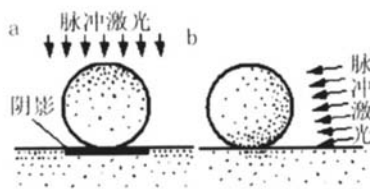


图 3 颗粒或基体对激光的吸收随入射角的变化

率比垂直入射时提高很多。LEE [13] 用波长为  $532\text{nm}$ , 脉宽为  $10\text{ns}$  的激光清洗铜基体上  $10\mu\text{m}$  的铜颗粒。垂直入射时光斑面积为  $0.13\text{cm}^2$ , 脉冲能量为  $0.14\text{J}$  时, 10 个脉冲能将颗粒完全清除, 平均能量密度为  $1.08\text{J}/\text{cm}^2$ , 基体的损伤阈值为  $0.8\text{J}/\text{cm}^2$ , 基体表面已

出现损伤。激光与基体表面成  $10^\circ$  夹角入射时, 光斑面积为  $1.35\text{cm}^2$ , 达垂直入射时的 10 倍, 平均能量密度为  $0.1\text{J}/\text{cm}^2$ , 此时也得到了完全清洗, 由于能量密度的大副降低, 基体表面没有损伤。

对透明基体, 可从反面入射去除颗粒。正面入射时颗粒下方的表面被遮住, 温度升高较小, 反面入射时颗粒与基体接触处不受阴影影响, 温度升高较大。LU, SONG [14, 15] 等人的研究表明, 反面入射的清洗率高于正面入射; 正面入射时, 颗粒越大, 颗粒与基体接触处的温度升高越小, 小颗粒更易清除; 反面入射时, 由于小颗粒单位面积上的吸附力更大, 大颗粒更易清除。

KIM, LEE 和 LIM [16~18] 等人研究了激光与基体平行入射时的颗粒去除行为。将与基体平行的激光聚焦于距离基体表面几毫米处, 焦点处高强度的激光引起周围气体爆炸, 产生等离子体冲击波将颗粒清除 (见图 4), 该方法也称激光冲击清洗。该方法能清除纳米

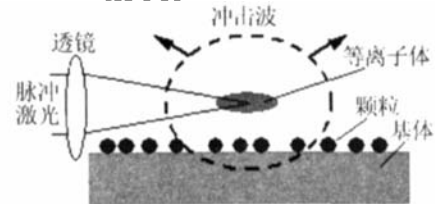


图 4 激光冲击清洗

级的细微颗粒, 清洗速度高于激光垂直入射, 由于避免了激光与基体的直接接触, 损伤基体的可能性大大降低, 且清洗效果不依赖于表面污物及基体对激光的吸收率, 可用于清洗低吸收率的材料, 但该方法局限于平面清洗。

2.2.4 激光与颗粒相互作用的影响 对透明颗粒, 当激光波长和颗粒尺寸接近时, 由于光散射、光共振、近地效应、凸镜效应等, 使颗粒与基体接触处的激光得到很大加强, 可以达到 1 个 ~ 2 个数量级 [19], 这虽然利于颗粒脱离基体, 但同时也容易损伤基体 [20]。ZHENG [2, 21] 等人的研究表明, 颗粒对激光的加强作用与激光波长、颗粒尺寸、激光入射角度、基体表面形貌等有关。不仅是球形颗粒, 不规则的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  颗粒也有光加强作用 [20]。

### 3 液膜激光清洗

液膜激光清洗比干式激光清洗具有更好的清洗效果, 可以在更低的能量密度下清除更小的颗粒, 且不易对基体造成损伤 [3, 22~24], 例如干式激光清洗难以清除 Si 基体上  $0.5\mu\text{m}$  以下的  $\text{SiO}_2$  颗粒 [7], 而液膜激光清洗却能有效去除 Si 基体上  $0.1\mu\text{m}$  的  $\text{SiO}_2$  颗粒 [24]。

#### 3.1 清洗机理分析

与干式激光清洗相比, 液膜激光清洗增加了因液

体表面张力引起的颗粒去除阻力,对微米、亚微米级细微颗粒,主要粘附力为范德瓦尔斯力和毛细力<sup>[23]</sup>:

$$F_{ad} = \frac{hr}{8\pi z^2} + \frac{h\delta^2}{8\pi z^3} + 4\pi\sigma_0$$

激光直接加热液体或基体吸收激光能量后再传热给液体,液体温度急速上升而发生超急速爆发沸腾,大量汽泡成核并急剧长大挤压液体产生压力波,为颗粒脱离提供了强大动力,对半径为  $r$  的颗粒产生的清洗力为<sup>[23]</sup>:  $F = \pi r^2 \times \sqrt{2\rho_c(P_v - P_\infty)}fv$ , 式中  $\rho$  为液体密度,  $c$  为压力波在液体中的传播速度,  $P_v$  为气泡内蒸气的蒸气压强,  $P_\infty$  为周围液体压强,  $f$  为液体中汽泡体积百分比,  $v$  为汽泡长大速度。上式是在假设液体是静止的、无粘性、不可压缩、无限延伸且汽泡压力随时间不变的前提下推导而来。激光加热微薄液体发生爆发沸腾,其过程短暂而复杂,以上假设的合理性值得商榷。激光加热微薄液体发生爆发沸腾时,热和流体严重偏离经典的热力学、动力学理论,这方面还少有研究,深入研究液膜激光清洗可极大地丰富这方面的理论<sup>[25]</sup>。

### 3.2 影响因素及规律

3.2.1 激光参数的影响 激光波长影响基体、液体层对激光的吸收率,从而影响清洗效果。TAM<sup>[3]</sup>等用不同波长的激光,液膜层主要成分是水,研究了 Si 基体上颗粒的去除行为。波长为 248nm 的激光,基体强烈吸收而液体透明,基体吸收激光能量后将热量传递给液体,基体与液体界面处的液体层过热发生爆发沸腾(见图 5a),颗粒的去除效果最好;波长 10.6 $\mu$ m 的激

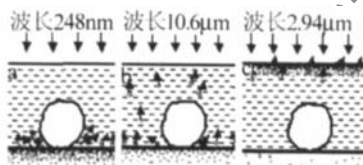


图 5 液膜激光清洗

光,液体、基体都部分吸收,激光在液体中的穿透深度约 20 $\mu$ m,当液体层厚度仅为几微米时,部分激光被液体吸收,部分激光穿过液体层被基体吸收,基体吸收激光能量后将热量传递给液体,基体和液体界面处的液体层过热发生爆发沸腾(见图 5b),但因能量不够集中,同样的去除效果需要更多的激光能量;波长 2.94 $\mu$ m 的激光,液体的上表面强烈吸收激光,只在液体上表面而不是基体和液体界面处发生爆发沸腾(见图 5c),颗粒去除效果不好。

激光脉冲宽度影响热在基体及液体中的扩散长度,从而影响清洗效果。脉冲宽度越短,热扩散长度越短,液体与基体界面处的液体层过热程度增加,可获得更大的清洗力,但脉冲宽度过短,会损伤基体表面。一

般认为,纳秒激光效果最好,微秒次之,毫秒激光则基本没有清洗效果<sup>[3,21]</sup>。

激光能量密度影响基体或液体吸收的能量,从而影响清洗率。MOSBACHER, LU<sup>[22-24]</sup>等人的研究表明,液膜激光清洗同样存在清洗与损伤阈值。能量密度低于清洗阈值时,没有清洗效果;能量密度高于清洗阈值后,随激光能量密度的增加,清洗率不断增加;而能量密度高于损伤阈值时,基体产生损伤。

3.2.2 液体物性的影响 液体的物性影响颗粒的去除效果,目前研究的液体主要有水、甲醇、乙醇、异丙醇等,它们的颗粒去除阈值和去除效率的具体值不同,但影响规律相似<sup>[3,23]</sup>。TAM<sup>[3]</sup>等人的研究表明,水的效果好于乙醇,但水的表面张力较大,水不容易浸润基体表面,难以形成连续的液膜层。一般采用水和 10% ~ 20% 的甲醇、乙醇或异丙醇溶液可以获得更好的清洗效果,加入甲醇、乙醇或异丙醇主要是为增加基体表面的湿润度,以便在基体表面形成连续均匀的液膜层。

3.2.3 颗粒材料、尺寸的影响 MOSBACHER, LU, LANG<sup>[22-24,26]</sup>等人的研究表明,对不同的材料、尺寸的颗粒,若激光参数、液体性质相同或相近,液膜激光清洗具有统一的清洗阈值,该值对应于液体开始爆发沸腾需要的能量密度,与液体汽泡成核长大等性质有关,与颗粒的材料及尺寸关系不大。MOSBACHER<sup>[22,24]</sup>等人用波长 532nm,脉宽 8ns, 2.5ns 及波长 583nm,脉宽 2.5ns 的激光,清洗 Si 基体上直径为 60nm ~ 800nm 的 PS, SO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗粒,表明存在统一的去除阈值。LANG<sup>[26]</sup>等人用波长 532nm,脉宽 8ns 的激光,研究了 Si 基体上直径 140nm ~ 1300nm 的 PS 颗粒的去除行为,同样发现水和异丙醇液膜层分别存在统一的去除阈值。

## 4 结束语

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,有着广阔的应用前景<sup>[27]</sup>。不同波长、不同脉冲宽度、不同能量密度、不同入射角对清洗效果的影响的研究有很多。研究的基体大多是 Si, 主要因为半导体工业的颗粒去除最为迫切,也研究过 PI, PMMA, Ge, NIP, 锂, 石英玻璃等。研究的颗粒材料有 PS, Cu, W, SO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 橡胶等,形状有球形、扁平形以及无规则形状,尺寸从几十纳米到几百微米。研究的液体层有水、甲醇、乙醇、异丙醇和丙酮等以及它们的混合物。虽然短脉冲激光去除细微颗粒在实践中取得了很好的

效果,然而由于其机理复杂,影响因素众多,目前,国际上对其机理的研究还很不深入,我国在这方面的研究才刚刚开展,研究细微颗粒的短脉冲激光清除对于我国工业技术创新和学术理论的丰富完善有着重要意义。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] ZHAO Zh M. The application of laser cleaning technology in micro electronics in industry field [ J ]. *Cleaning Technology*, 2004, 2( 8 ): 29~ 34( in Chinese ).
- [ 2 ] ZHENG Y W, LUK YANCHUK B S, LU Y F *et al*. Dry laser cleaning of particles from solid substrates experiments and theory [ J ]. *J A P*, 2001, 90( 5 ): 2137~ 2142
- [ 3 ] TAM A C, LEUNG W P, ZAPKA W *et al*. Laser cleaning techniques for removal of surface particulates [ J ]. *J A P*, 1992, 71( 7 ): 3515~ 3523
- [ 4 ] LU Y F, SONG W D, LOW T S. Laser cleaning of micro particles from a solid surface— theory and applications [ J ]. *Materials Chemistry and Physics*, 1998, 54( 1 ): 181~ 185.
- [ 5 ] FOURRER T, SCHREM S G, MUHLBERGER T *et al*. Laser cleaning of polymer surfaces [ J ]. *Appl Phys* 2001, A72( 1 ): 1~ 6.
- [ 6 ] KERRY J D, STUFF M I, HOVUS F E *et al*. Removal of small particles from surfaces by pulsed laser irradiation. [ J ]. *Proc SPIE*, 1991, 1415: 211~ 219
- [ 7 ] LU Y F, ZHENG Y W, SONG W D. Laser induced removal of spherical particles from silicon wafers [ J ]. *J A P*, 2000, 87( 3 ): 1534~ 1539
- [ 8 ] SONG W D, HONG M H, LEE SH *et al*. Real time monitoring of laser cleaning by an airborne particle counter [ J ]. *Applied Surface Science*, 2003, 208( 2 ): 306~ 310.
- [ 9 ] DOBLER V, OLTRA R, BOQUILLON J P *et al*. Surface acceleration during dry laser cleaning of silicon [ J ]. *Appl Phys* 1999, A69( 7 ): 335~ 337.
- [ 10 ] LI J Ch. Calculation of laser diffraction and heat interaction [ M ]. Beijing: Science Press, 2001. 341~ 432( in Chinese ).
- [ 11 ] TAM A C, PARK H K, GRIGOROPOULOS G P. Laser cleaning of surface contaminants [ J ]. *Applied Surface Science*, 1998, 127( 3 ): 721~ 725.
- [ 12 ] LU Y F, SONG W D, ANG B W *et al*. A theoretical model for laser removal of particles from solid surfaces [ J ]. *Appl Phys* 1997, A65( 1 ): 9~ 13
- [ 13 ] LEE J M, WATKINS K G, STEEN W M. Angular laser cleaning for effective removal of particles from a solid surface [ J ]. *Appl Phys* 2000, A71( 6 ): 671~ 674.
- [ 14 ] VEREECKE G, ROHRE, HEYNS M M. Influence of beam incidence angle on dry laser cleaning of surface particles [ J ]. *Applied Surface Science*, 2000, 157( 1 ): 67~ 73
- [ 15 ] SONG W D, HONG M H, KOH H L *et al*. Laser induced removal of plate-like particles from solid surface [ J ]. *Applied Surface Science*, 2002, 186( 1 ): 69~ 74
- [ 16 ] KIM T, LEE J M, CHO S H *et al*. Acoustic emission monitoring during laser shock cleaning of silicon wafers [ J ]. *Optics and Laser in Engineering*, 2005, 43( 9 ): 1010~ 1020.
- [ 17 ] LEE S H, PARK J G, LEE J M *et al*. Si wafer surface cleaning using laser induced shock wave—a new dry cleaning methodology [ J ]. *Surface and Coatings Technology*, 2003, 169( 1 ): 178~ 180.
- [ 18 ] LIM H, KIM D. Optical diagnostics for particle cleaning process utilizing laser induced shockwave [ J ]. *Appl Phys* 2004, A79( 5 ): 965~ 968.
- [ 19 ] LUK B S, WANG Z B, SONG W D *et al*. Particle on surface 3-D-effects in dry laser cleaning [ J ]. *Appl Phys* 2004, A79( 4 ): 747~ 751.
- [ 20 ] MOSBACHER M, MUNZERT H, J ZMMERMANN J. Optical field enhancement effects in laser assisted particle removal [ J ]. *Appl Phys* 2001, A72( 1 ): 41~ 44.
- [ 21 ] ZHENG Y W, LU Y F, SONG W D. Angular effect in laser removal of spherical silica particles from silicon wafers [ J ]. *J A P*, 2001, 90( 1 ): 59~ 63
- [ 22 ] MOSBACHER M, CHAOUIN, SEGEL J *et al*. A comparison of ns and ps steam laser cleaning of Si surface [ J ]. *Appl Phys* 1999, A69( 7 ): 331~ 334.
- [ 23 ] LU Y F, ZHANG Y, WAN Y H *et al*. Laser cleaning of silicon surface with deposition of different liquid films [ J ]. *Applied Surface Science*, 1999, 138( 1 ): 140~ 144
- [ 24 ] MOSBACHER M, DOBLER V, BONEBERG J *et al*. Universal threshold for the steam laser cleaning of sub-micron spherical particles from silicon [ J ]. *Appl Phys* 2000, A70( 6 ): 669~ 672.
- [ 25 ] JIN R X, HUA IX L, LIU D Y. The applicability of classical theory for rapid transient explosive boiling [ J ]. *Journal of Engineering Thermo Physics*, 2003, 24( 6 ): 1013~ 1015( in Chinese ).
- [ 26 ] LANG F, MOSBACHER M, LEIDERER P. Near field induced defects and influence of the liquid layer thickness in steam laser cleaning of silicon wafers [ J ]. *Appl Phys* 2003, A77( 1 ): 117~ 123
- [ 27 ] CAO B Q, ZENG X Y. Review of patents in laser processing in China and America [ J ]. *Laser Technology*, 2004, 28( 4 ): 346~ 351( in Chinese ).

(上接第 297 页)

### 参 考 文 献

- [ 1 ] BORN M, WOLF E. Optics principle [ M ]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005. 352( in Chinese ).
- [ 2 ] GRAVELSAETER T, STAMNES J J. Diffraction by circular apertures I: method of linear phase and amplitude approximations [ J ]. *Appl Opt* 1982, 21( 20 ): 3644~ 3651.
- [ 3 ] STAMNES J J, SPJELKAVIK B, PEDERSEN H M. Evaluation of diffraction integrals using local phase and amplitude approximations [ J ]. *Optica Acta* 1983, 30( 2 ): 207~ 222.
- [ 4 ] KRAUSH G. Finite element area and line integral transforms for generalization of aperture function and geometry in Kirchhoff scalar diffraction theory [ J ]. *Opt Engng* 1993, 32( 2 ): 368~ 383.
- [ 5 ] LI J Ch. Diffraction of laser and calculation on thermal acting [ M ]. Beijing: Science Press, 2002. 81~ 97( in Chinese ).
- [ 6 ] LING D X, LI J Ch, LIX Y. Numerical simulation of laser field across the diffraction limited optics system [ J ]. *Laser Technology*, 2002, 26( 4 ): 284~ 286( in Chinese ).
- [ 7 ] TAO Y Q. Physical experiment of university [ M ]. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 2002. 126~ 131( in Chinese ).