

文章编号 1004-924X(2006)05-0764-07

# 激光清洗硅片表面 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 颗粒的试验和理论分析

吴东江<sup>1,2</sup>, 许媛<sup>2</sup>, 王续跃<sup>1</sup>, 康仁科<sup>1</sup>, 司马媛<sup>1</sup>, 胡礼中<sup>2</sup>

(1. 大连理工大学 精密与特种加工教育部重点实验室, 辽宁 大连 116024;

2. 大连理工大学 三束材料改性国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

**摘要:**以 KrF 准分子激光器为激光源,对目前工业上常用的硅片研磨抛光液的主要成分  $\text{Al}_2\text{O}_3$  颗粒进行激光清洗的试验和理论分析。建立一维热传导模型,利用有限元分析软件 MSC. MarC 模拟硅片表面的温度随激光作用时间和能量密度的分布。通过理论计算,量化了颗粒所受到的清洗力以及其与硅片表面之间的粘附力,理论预测出  $1\ \mu\text{m}$   $\text{Al}_2\text{O}_3$  颗粒的激光清洗阈值为  $60\ \text{mJ}/\text{cm}^2$ 。在理论分析的指导下,利用  $248\ \text{nm}$ 、 $30\ \text{ns}$  的 KrF 准分子激光进行单因素试验,研究激光能量密度、脉冲个数、激光束入射角度对激光干法清洗效率的影响,并且实验验证了清洗模型以及场增强效应对激光清洗结果的影响。

**关键词:**激光清洗;硅片;清洗效率; $\text{Al}_2\text{O}_3$  颗粒

**中图分类号:** TN249 **文献标识码:** A

## Experimental and theoretical study on laser cleaning $\text{Al}_2\text{O}_3$ particle on silicon wafer surface

WU Dong-jiang<sup>1,2</sup>, XU Yuan<sup>2</sup>, WANG Xu-yue<sup>1</sup>, KANG Ren-ke<sup>1</sup>, SIMA Yuan<sup>1</sup>, HU Li-zhong<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory for Precision and Non-traditional Machining Technology of Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. State Key Laboratory for Materials Modification by Laser, Ion and Electron Beams, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** The laser cleaning of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particles which are the main component of the silicon wafer lap-polishing solution commonly used in industry nowadays was studied by experiments combined with theoretical analysis. The simple heat-conduction model was built and the temperature field on silicon wafer surface during laser cleaning was simulated using the finite element method. The adhesion force between the particle and the substrate and cleaning force acting on the particles were calculated, and the theoretical threshold of laser cleaning  $1\ \mu\text{m}$   $\text{Al}_2\text{O}_3$  is  $60\ \text{mJ} \cdot \text{cm}^{-2}$ . Under the guidance of the mechanism analysis, a serial of laser dry cleaning experiments were carried out to study the dependence of laser cleaning efficiency on laser fluence, numbers of pulse, and laser beam incidence angle on silicon wafer surface using  $248\ \text{nm}$ ,  $30\ \text{ns}$ , KrF excimer laser, Which confirmed the clean model as well as the effect of the field enhancement on laser cleaning.

收稿日期:2006-01-18;修订日期:2006-06-13.

基金项目:国家自然科学基金重大项目(No. 52090101),“863”计划资助项目(No. 2002AA421230)。

**Key words:** laser cleaning; silicon wafer; cleaning efficiency;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particle

## 1 引言

半导体硅作为现代电子工业的基础材料已有半个世纪的历史,随着亚微米及深亚微米超大规模集成电路(ULSI)遵循着“摩尔定律”迅速发展,设计线宽急剧减小,基体表面的亚微米污染物足以致大量的缺陷<sup>[1]</sup>产生并对生产领域造成一系列影响,所以对硅材料的表面质量提出了越来越苛刻的要求<sup>[2]</sup>。传统的清洗技术,如 RCA 清洗、超声波清洗、机械双面刷片法,有的不能有效地去除微米级和亚微米级的颗粒,或者能够去除它们,但也会损伤基体的表面。激光清洗技术就是在这样的背景下开发的一种新型的清洗技术。

新加坡国立大学激光微处理技术实验室的 Lu Yongfeng, Hong Minghui 研究小组的专家学者在机理和试验方面,对各种不同材料的表面沾污以及不同类别的基体均做了大量详细的研究,包括激光干法与湿法清洗的机理<sup>[3-7]</sup>、场增强效应<sup>[8-9]</sup>、颗粒附着及样片制备<sup>[10]</sup>、各参数对激光清洗的影响<sup>[11-12]</sup>等许多方面,但涉及半导体硅片激光清洗方面的研究所占份量相对较少。国内华中科技大学的谭东晖、陆冬升等人<sup>[13-14]</sup>采用有限元方法分析了激光清洗过程中基片表面的温度分布,推导出了清洗硅片表面油脂的清洗阈值和损伤阈值。西北工业大学史兴宽、徐传义等人<sup>[15]</sup>也在相近的领域做了相关研究,进行了光学基片表面软质抛光胶体颗粒的激光清洗实验。

本文以 KrF 准分子激光器作为激光源,对目前工业上常用的硅片研磨抛光液的主要成分  $\text{Al}_2\text{O}_3$  颗粒进行激光清洗的试验和理论分析,研究了能量密度、脉冲个数、激光束入射角度等参数对清洗效率的影响,并验证了清洗模型以及场增强效应对激光清洗结果的影响。

## 2 物理模型及预测

### 2.1 硅片表面温度场计算模型的建立

针对激光干法清洗硅片表面过程的实际情况,建立了受激光辐照后硅片表面一维热传导温度场计算模型。为了更加逼近真实的激光过程,采取的假设条件如下:(1)硅片表面对激光的吸收系数不随温度变化。(2)材料的性能参数为温度的函数。(3)假设在激光加热期间,基体的表面没有向基体和外界发生热传导和热辐射。(4)假设基片横向的热传导不影响温度场的分布。(5)入射激光束功率密度恒定,激光脉冲为矩形均匀分布:

$$I(t) = \begin{cases} I & 0 < t < t_0, \\ 0 & t < 0, t > t_0 \end{cases}, \quad (1)$$

一维瞬态热传导模型的建立:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = 0, \quad (2)$$

初始条件为:  $T(0) = 20\text{ }^\circ\text{C}$

边界条件为:

$$AI(t) = -k \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right)_{z=0}, \quad (3)$$

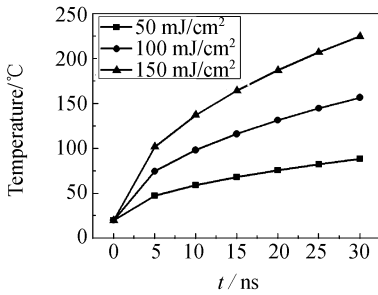
其中,  $A$  为硅片表面对激光的吸收系数,  $\alpha$  是热扩散率(即导温系数,如表 1 所示)。

利用以上建立的激光干法清洗硅片表面温度的数学模型,使用有限元分析软件 MSC. MarC 计算了激光干法清洗硅片表面的温度场。图 1(a)表示的是当激光能量密度分别为  $50\text{ mJ}/\text{cm}^2$ ,  $100\text{ mJ}/\text{cm}^2$  和  $150\text{ mJ}/\text{cm}^2$  时,硅片表面温度随激光作用时间的变化。图 1(b)表示的是一个脉冲结束后,也就是  $30\text{ ns}$  结束时,对应于不同的单个脉冲能量密度,硅片表面的温度值。由图 1(b)可知,温度随着能量密度的增加呈线性增长的趋势。

表 1 各温度下硅的热物性参数

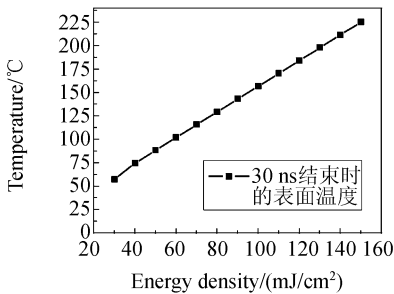
Tab. 1 Thermal parameters of silicon at different temperatures

温度/°C	57.3	74.7	88.39	102.06	115.74	129.42	143.10
比热容 $C$ [J/(kg·°C)]	735.23	750.98	762.51	773.28	783.31	792.59	801.11
导热系数 $k$ [W/(m·°C)]	131.59	122.18	115.37	109.10	103.34	98.11	93.41
热扩散率 $\alpha$ [ $10^{-5}$ m <sup>2</sup> /s]	7.705	7.004	6.513	6.073	5.679	5.329	5.019
温度/°C	156.77	170.45	184.13	197.82	211.48	225.16	327
比热容 $C$ [J/(kg·°C)]	808.88	815.91	822.19	827.72	832.49	836.52	867
导热系数 $k$ [W/(m·°C)]	89.23	85.57	82.43	79.82	77.73	76.17	62
热扩散率 $\alpha$ [ $10^{-5}$ m <sup>2</sup> /s]	4.748	4.515	4.316	4.151	4.02	3.92	3.078



(a) 温度场与时间的关系

(a) Temperature field vs time



(b) 温度场与能量密度的关系

(b) Temperature field vs energy density

图 1 强基体吸收时硅片表面温度与时间和能量密度分布的关系

Fig. 1 Distribution of temperature field of silicon wafer surface with time and energy density

## 2.2 清洗阈值的理论预测

目前,激光干法清洗的机理主要是瞬时热膨胀原理。即颗粒与基体经短脉冲激光辐照后,光

能转化为热能,引起颗粒、基体、或二者同时在瞬时产生热膨胀,在颗粒与基体之间产生一个强大的瞬时加速度,使得颗粒与基体脱离。另外还可能存在的机理是爆破气化机理,即存在于颗粒与基体之间的空气潮湿水分,在吸收激光能量后,产生瞬时的爆破式的气化,将颗粒从基体表面带走。在热膨胀机理中,存在有两种作用源。一是颗粒、基体、或两者同时吸收激光,将光能转换为热能,产生瞬时热膨胀;二是场增强效应。根据 Mie 理论<sup>[16-18]</sup>,被一束普通平整的电磁波照射的颗粒,它对于输入的光束就像是一个空腔,使到达颗粒下方的光强密度增加。应用到激光干法清洗中,也即在基体上方的颗粒类似一个聚焦透镜的作用,当激光辐照颗粒与基体时,通过颗粒的激光束被聚焦,使得到达颗粒与基体之间区域的激光能量密度增强,增强后的激光被吸收后同样转化为热能,产生热膨胀。

### (1) 粘附力 $F_{ad}$ 的计算

范德华力是激光清洗技术中考虑的主要粘附力。对于半径为  $R$  的球形颗粒与无限厚的基板之间的范德华力可表示为:

$$F_w = \frac{A_{132}R}{6H^2}, \quad (4)$$

其中,  $R$  为颗粒的半径;  $H$  是颗粒与基体之间的距离;  $A_{132}$  是颗粒 1 与基体 2 在介质 3 中相

相互作用的 Hamaker 常数,由下式给出:

$$A_{132} = (\sqrt{A_{11}} - \sqrt{A_{33}})(\sqrt{A_{22}} - \sqrt{A_{33}}), \quad (5)$$

其中,  $A_{ii}$  表示物质  $i$  在真空中相互作用的 Ha-

maker 常数(如表 2 所示)。Hamaker 常数  $A_{ii}$  与构成物质的分子之间的相互作用参数有关,是物质所固有的一种特征参数。

表 2 颗粒与基体的物理参数

Tab. 2 Physical parameters of particle and substrate

参数	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 的 Hamaker 常数 $A_{11}$	Si 的 Hamaker 常数 $A_{22}$	空气的 Hamaker 常数 $A_{33}$	$A_{132}$	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 的密度 $\rho$
参数值	$15.2 \times 10^{-20}$ J	$8.86 \times 10^{-20}$ J	$1.94 \times 10^{-20}$ J	$2.05 \times 10^{-20}$ J	3 990 kg/m <sup>3</sup>

由此便可根据式(4)计算出 1  $\mu$ m Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗粒与硅片基体间的粘附力约为  $1.066 \times 10^{-8}$  N。

(2)清洗力  $F_{\text{clean}}$  的计算

在激光干法清洗中,起主要作用的仍然是瞬时热膨胀机理。根据受热膨胀的物质不同,可将激光干法清洗分为基体热膨胀去除颗粒、颗粒自身热膨胀脱离基体以及两者共同吸收三种方式,当颗粒的大小比入射光的波长小很多时,由于颗粒的形状不规则、表面不均匀以及分布的不均匀性,使入射光从各个方向被反射,颗粒以自身膨胀脱离机体的可能性很小。在本试验中,作为去除对象的颗粒直径大于所使用的激光波长,所以应该以硅片基体强吸收激光为主。

激光的能量被硅片基体吸收,基体表面温度迅速升高,同时热波向基体内部传播。由于激光的瞬态热效应,基体表层产生垂直于表面向外的瞬时热膨胀加速度,该加速度作用在吸附于基体表面的颗粒上,相当于颗粒受到该方向上的清洗力  $F_{\text{clean}}$ ,当清洗力大于颗粒与基体间粘附力时,即  $F_{\text{clean}} > F_{\text{ad}}$ ,颗粒与基体分离。

假设硅片基体吸收激光后表面温度上升  $\Delta T_{\text{Si}}$ ,那么硅片表面产生的垂直于表面向外的热膨胀位移为:

$$H_{\text{Si}} = \beta_{\text{Si}} \delta_{\text{Si}} \Delta T_{\text{Si}}, \quad (6)$$

$$\delta_{\text{Si}} = \sqrt{4\alpha t}. \quad (7)$$

其中,  $\beta_{\text{Si}}$  是硅的热膨胀系数(如表 3 所示);  $\delta_{\text{Si}}$  是硅在时间  $t$  内的热穿透深度。

表 3 硅的基本热物性参数

Tab. 3 Basic parameters of silicon wafer

密度 $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	热膨胀系数 $\beta$ [10 <sup>-6</sup> /°C]	硅对 248nm 激光的吸收率 $A$
2323	2.6	33%

假设颗粒受到与基体相同的瞬时热膨胀加速度,那么在一个激光脉冲作用结束时,所作用在颗粒上的清洗力为:

$$F_{\text{clean, Si}} = mH_{\text{Si}}/\tau^2, \quad (8)$$

其中,  $m$  是颗粒的质量;  $\tau$  是激光脉冲。

将插值法计算所得的不同激光能量密度下硅片表面温度所对应的比热容  $C$ 、导热系数  $k$  和热扩散率  $\alpha$  的数值(如附录表 1 所示)代入公式(6)(7)(8)即可计算出强基体吸收激光时不同激光能量密度下硅片表面的热膨胀位移、颗粒所获得的清洗力。

如图 2 所示,清洗力随着能量密度的增加呈线性增加的趋势,当能量密度为 60 mJ/cm<sup>2</sup> 时,清洗力就到  $1.07 \times 10^{-8}$  N,超过了粘附力,达到清洗阈值,所以理论预测 1  $\mu$ m Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗粒的清洗阈值为 60 mJ/cm<sup>2</sup>。

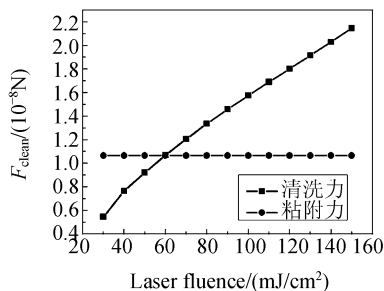


图 2 理论预测结果

Fig. 2 Results of theoretical calculation

### 3 激光清洗试验及分析

#### 3.1 实验条件和设备

波长 248 nm、脉宽 30 ns 的 KrF 准分子激光器作为激光源,样片被固定在一个可进行 X、Y、Z

方向移动的工作台上,对样片进行逐点单个或多个脉冲的激光辐照,248 nm 的 KrF 准分子激光垂直照射到硅片表面的长方形光斑面积为  $1\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 。

实验采用 MX40 光学显微镜对激光清洗前后的硅片表面进行观测,并拍摄清洗前后的照片。清洗结果的评价采用自行编制的程序,对光学显微镜拍摄到的激光清洗前后的图片进行图像处理,可以精确统计硅片表面所采集区域内颗粒粘污的个数,从而确定激光的清洗效率。记录清洗前硅片表面颗粒数为  $N_a$ ,清洗后表面颗粒数为  $N_b$ ,则清洗效率被定义为  $(1 - N_b/N_a)$ 。

### 3.2 样片的制备

#### (1) 硅片标记制备

厚度为  $650\text{ }\mu\text{m}$  的硅抛光片,制成若干大小为  $5\text{ mm} \times 10\text{ mm}$  的样片,在每个样片中心做宽度为  $5\text{ }\mu\text{m}$  左右的十字标记,利用引导光束使激光束辐照到十字标记处,以保证清洗区域的正确性,并确保激光清洗前后所评价区域的一致性。

#### (2) 颗粒的分散与附着

试验采用人为沉积的方法使颗粒附着在硅片表面。首先选取溶剂为 99.7% 的乙醇,将颗粒与溶剂混合制备成为悬浮液,采用机械搅拌分散和超声分散的方法使颗粒在溶剂中分散,然后将悬浮液沉积在样片表面,最后通过甩膜,利用离心力的作用使颗粒沉积在硅片表面,以保证颗粒在样片上分布均匀。

### 3.3 硅片表面颗粒的激光清洗试验及分析

#### 3.3.1 能量密度对清洗效率的影响

由前面的理论预测可知  $1\text{ }\mu\text{m}$   $\text{Al}_2\text{O}_3$  颗粒的清洗阈值为  $60\text{ mJ/cm}^2$ 。在此基础上选取了一系列的激光能量密度值。实验结果如图 3 所示:

由图中可知,从  $30\sim 40\text{ mJ/cm}^2$  开始出现清洗效果,并逐渐增加,当能量密度增加到  $80\text{ mJ/cm}^2$  时,清洗率达到 91%,并在以后的能量密度下保持稳定,清洗率维持在 91%~95% 之间。整个清洗过程硅表面没有出现热损伤,直到激光能量密度增加至  $320\text{ mJ/cm}^2$  左右时,硅表面开始出现损伤。

如图 3 所示,硅抛光片表面  $1\text{ }\mu\text{m}$   $\text{Al}_2\text{O}_3$  颗粒的试验清洗阈值为  $30\sim 40\text{ mJ/cm}^2$ ,很明显试验所得的清洗阈值小于理论预测值。这是因为,在理论计算时仅考虑了硅片表面热膨胀机理,而没

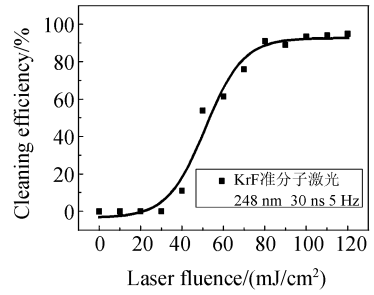
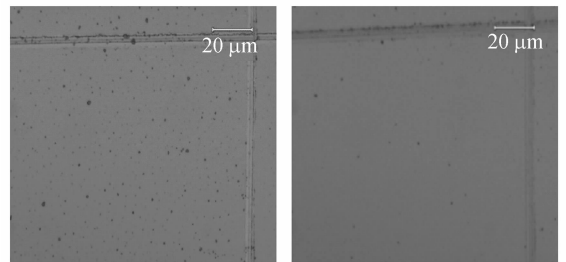


图 3 激光能量密度对清洗效率的影响

Fig. 3 Dependence of laser fluence on cleaning efficiency

有对场增强效应进行定量分析,但在实际清洗过程中,由于基体表面颗粒类似透镜的聚焦作用,使得到达颗粒下方与基体之间区域的激光能量密度增加,结果导致实际上使用小于理论值的能量密度即可达到好的清洗结果。试验清洗阈值与理论值的差别恰好说明场增强效应与空气潮湿成分爆破升华机理的存在,这与机理分析和理论预测相一致。

从图 3 中可以看出,清洗效率随着激光能量密度的增大而增大。这是由于当激光能量密度增加时,硅片表面的温度相应升高,且随着能量密度的增加,表面的温升值也在增加,并由公式(6)、(8)可知,随着基体表面温升的增加,热膨胀位移、加速度同时增加,颗粒所获得的清洗力也增大,所以清洗效率也相应增加。



(a) 清洗前 1000× (b) 清洗后 1000×  
(a) Before laser cleaning (b) After laser cleaning

图 4 硅片表面  $1\text{ }\mu\text{m}$   $\text{Al}_2\text{O}_3$  颗粒准分子激光清洗前后的光学显微镜照片

Fig. 4 Optical micrographs ( $\times 1000$ ) of silicon wafer surface before and after laser cleaning

图 4 所示为单个脉冲能量密度为  $90\text{ mJ/cm}^2$  时,激光清洗前后的硅抛光片表面放大 1000 倍的光学显微镜照片。图(a)中较大的颗粒即为  $1\text{ }\mu\text{m}$

$\text{Al}_2\text{O}_3$  颗粒团聚而成的颗粒,由照片(b)可以看到  $1\ \mu\text{m}$   $\text{Al}_2\text{O}_3$  颗粒及其团聚颗粒被明显去除,激光的清洗效率达到 90%。

### 3.3.2 脉冲个数对清洗效率的影响

图 5 表示当频率为 7 Hz、单个脉冲能量密度为  $35\ \text{mJ}/\text{cm}^2$  时,作用的激光脉冲个数对  $1\ \mu\text{m}$   $\text{Al}_2\text{O}_3$  颗粒清洗效率的影响。如图 5 可以看出,开始时清洗效率随脉冲个数的增加而迅速增大。对  $1\ \mu\text{m}$   $\text{Al}_2\text{O}_3$  颗粒清洗时,用  $35\ \text{mJ}/\text{cm}^2$  的能量密度的激光,3 个脉冲后就可达到 26.7% 的清洗效率。随着脉冲数的增多,激光清洗率近似线性迅速增加,当作用脉冲数为 10 个时,就已得到高达 92% 的清洗效率。随着脉冲个数的继续增加,清洗率稳定保持在 92% 以上,并且未对硅片表面造成损伤,这相当于单个脉冲能量为  $80\ \text{mJ}/\text{cm}^2$  时的清洗效率。因此,在激光清洗过程中,可以选择较小的能量密度采用多个脉冲进行清洗,这样既可以得到很高的清洗效率,又可以避免对硅片表面造成损伤。

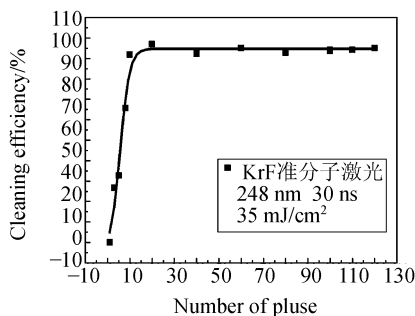


图 5 脉冲个数对  $1\ \mu\text{m}$   $\text{Al}_2\text{O}_3$  颗粒清洗效率的影响

Fig. 5 Dependence of pulse number on cleaning efficiency

### (3) 激光束入射角度对清洗效率的影响

图 6 所示为当频率为 5 Hz、激光能量密度为  $75\ \text{mJ}/\text{cm}^2$  时,  $1\ \mu\text{m}$   $\text{Al}_2\text{O}_3$  颗粒清洗效率随激光束入射角度的变化趋势。从图 6 中可看出,随着入射角度的增大,清洗效率逐渐增加,至垂直入射时清洗效率达到峰值,这与图 3 中能量密度为  $75\ \text{mJ}/\text{cm}^2$  时的数值相吻合,但整体看来,尽管清洗效率随入射角度的增加而增大,但仍然是垂直入

射时所能达到的激光清洗效率最高。因此,在相同的激光能量密度下,改变激光束的入射角度无法提高清洗效率。

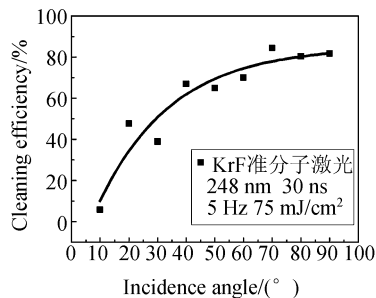


图 6 入射角度对  $1\ \mu\text{m}$   $\text{Al}_2\text{O}_3$  清洗效率的影响

Fig. 6 Dependence of laser beam incidence angle on cleaning efficiency at  $75\ \text{mJ}/\text{cm}^2$

## 4 结 论

(1) 利用有限元分析软件 MSC. MarC 模拟了硅片表面的温度随激光作用时间和能量密度的分布。量化了颗粒所受到的清洗力以及其与硅片表面之间的粘附力,预测出  $1\ \mu\text{m}$   $\text{Al}_2\text{O}_3$  颗粒的激光清洗阈值为  $60\ \text{mJ}/\text{cm}^2$ 。

(2) 试验所测得清洗阈值为  $30\sim 40\ \text{mJ}/\text{cm}^2$ , 与理论值的差别说明场增强效应与空气潮湿成分爆破升华机理的存在。

(3) 试验测得 KrF 准分子激光干法清洗硅片表面  $1\ \mu\text{m}$   $\text{Al}_2\text{O}_3$  颗粒的损伤阈值约为  $320\ \text{mJ}/\text{cm}^2$ , 而激光能量密度远小于这个损伤阈值时,就可以获得最好的清洗效果。

(4)  $1\ \mu\text{m}$   $\text{Al}_2\text{O}_3$  颗粒的清洗效率均随能量密度、脉冲个数、激光束入射角度的增加而增加,但在相同的激光能量密度下,改变激光束的入射角度无法提高清洗效率。在实际清洗时,可以选取较低的能量密度,采用多个脉冲,激光束垂直入射,既可获得高的清洗效率又不损伤硅片表面形貌。由此可见,248 nm, 30 ns 的准分子激光干法清洗对于去除硅抛光片表面的  $1\ \mu\text{m}$   $\text{Al}_2\text{O}_3$  颗粒是非常有效的。

## 参考文献:

- [1] 李玉和,李庆祥,王东生,等.超精表面缺陷检测系统的实验研究[J].*光学精密工程* 2005,13:65-68.  
LI Y H, LI Q X, WANG D SH, *et al.* Design and study on a novel micro-detecting device for superfinish surface scratch[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2005,13:65-68. (in Chinese)
- [2] 韩荣久,孙恒德,徐德全.单晶硅片的低温抛光技术[J].*光学精密工程*,1998,(6)5:104-109.  
HAN R J, SUN H D, XU D Q. Cryogenic polishing technology of monocrystal line silicon wafer[J]. *Optics and Precision Engineering* 1998,(6)5:104-109. (in Chinese)
- [3] ALLEN S D, MILLER A S, LEE S J. Laser assisted particle removal dry-cleaning of critical surfaces[J]. *Materials Science and Engineering*, 1997,49:85-88.
- [4] BLOISI F, BARONE A C, VICARI L. Dry laser cleaning of mechanically thin films[J]. *Applied Surface Science*, 2004,238:121-124.
- [5] VEIKO V P, SHAKHO E A, VOLKOVYSKI B V. Peculiarities of steam laser cleaning[J]. *SPIE*, 2002,4426:322-325.
- [6] WATKINS K G, CURRAN C, LEE J M. Two new mechanisms for laser cleaning using Nd:YAG sources[J]. *Journal of Cultural Heritage*, 2003,4:59-64.
- [7] ARNOLD N. Theoretical description of dry laser cleaning[J]. *Applied Surface Science*, 2003,(208-209):15-22.
- [8] KONOV V I, KONONENKO V V, LOMONOSOV A M, *et al.* Laser induced surface cleaning from diamond particles[J]. *SPIE*, 2002,4426:347-350.
- [9] LUK'YANCHUK B S, ZHENG Y W, LU Y F. Particle on the surface: Basic physical problems related to laser cleaning[J]. *SPIE*, 2002,4426:284-289.
- [10] KANE D, FERNANDES A. Laser cleaning of particles from surfaces-issues relating to sample preparation[J]. *SPIE*, 2002,4426:334-339.
- [11] FERNANDES A, KANE D. Dry laser cleaning threshold fluence-How can it be measured accurately[J]. *SPIE*, 2002,4426:290-295.
- [12] TAKAI M, SUZUKI N, YAVAS O, *et al.* Wavelength dependence of laser cleaning for field emitter arrays[J]. *SPIE*, 2002,4426:302-307.
- [13] 谭东晖,陆冬生.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. Experiment studies of excimer laser cleaning of grease-contaminated Si substrate[J]. *Laser Technology*, 1995,19(5):319-320. (in Chinese)
- [14] 谭东晖,陆冬生.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):50-53.  
TAN D H, LU D SH. A finite element analysis of the temperature distribution on a substrate surface during laser cleaning[J]. *J. Huazhong Univ. of Sci & Tech*, 1996,24:50-53. (in Chinese)
- [15] 史兴宽,徐传义.光学基片表面软质抛光胶体粒子的激光清洗[J].*航空精密制造技术*,2000,36(3):12-15.  
SHI X K, XU CH Y. Laser cleaning of soft colloid particles on optical substrates surface[J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 2000, 36(3):12-15. (in Chinese)
- [16] STRATTON J A. *Electromagnetic theory*[M]. New York & London: McGrawHill, 1991.
- [17] KERKER M. *The scattering of light*[M]. New York & London: Academic Press, 1969.
- [18] HULST H C V. *Light scattering by small particles*[M]. New York: Dower Publ, 1981.

作者简介:吴东江(1964—),男,山东人,教授,博士,主要从事激光与材料相互作用机理及激光精密微细加工领域的研究。E-mail:djwudut@dlut.edu.cn