

## 硅片表面纳米颗粒剥离及其成分检测方法研究

刘立拓 王春龙 余晓娅 石俊凯 黎尧 陈晓梅 周维虎

### Study of nano particle stripping and composition inspection on wafer surface

Liu Li-Tuo Wang Chun-Long Yu Xiao-Ya Shi Jun-Kai Li Yao Chen Xiao-Mei Zhou Wei-Hu

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 69, 165201 (2020) DOI: 10.7498/aps.69.20200517

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200517>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

不同样品温度下聚焦透镜到样品表面距离对激光诱导铜击穿光谱的影响

Influence of distance between focusing lens and sample surface on laser-induced breakdown spectroscopy of brass at different sample temperatures

物理学报. 2019, 68(6): 065201 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182198>

基于自吸收量化的激光诱导等离子体表征方法

Laser-induced plasma characterization using self-absorption quantification method

物理学报. 2018, 67(16): 165201 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180374>

激光诱导氮气等离子体时间分辨光谱研究及温度和电子密度测量

Time-resolved spectra and measurements of temperature and electron density of laser induced nitrogen plasma

物理学报. 2017, 66(9): 095201 <https://doi.org/10.7498/aps.66.095201>

飞秒激光成丝诱导Cu等离子体的温度和电子密度

Temperature and electron density in femtosecond filament-induced Cu plasma

物理学报. 2017, 66(11): 115201 <https://doi.org/10.7498/aps.66.115201>

共轴双脉冲激光诱导击穿光谱结合双谱线内标法定量分析植物油中的铬

Quantitative analysis of chromium in vegetable oil by collinear double pulse laser-induced breakdown spectroscopy combined with dual-line internal standard method

物理学报. 2017, 66(5): 054206 <https://doi.org/10.7498/aps.66.054206>

再加热双脉冲激光诱导击穿光谱技术对黄连中Cu和Pb的定量分析

Quantitative analysis of Cu and Pb in *Coptidis* by reheated double pulse laser induced breakdown spectroscopy

物理学报. 2019, 68(12): 125202 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190148>

# 硅片表面纳米颗粒剥离及其成分检测方法研究\*

刘立拓<sup>1)†</sup> 王春龙<sup>2)</sup> 余晓娅<sup>3)</sup> 石俊凯<sup>1)</sup> 黎尧<sup>1)</sup> 陈晓梅<sup>1)</sup> 周维虎<sup>1)</sup>

1) (中国科学院微电子研究所光电技术研究中心, 北京 100094)

2) (解放军 32180 部队, 北京 100012)

3) (试验物理与计算数学重点实验室, 北京 100094)

(2020 年 4 月 8 日收到; 2020 年 5 月 14 日收到修改稿)

硅片表面纳米级污染颗粒的检测与去除是集成电路制造 (Integrated Circuit, IC) 的关键环节. 本文主要对纳秒级脉冲激光作用至硅片表面后纳米颗粒的动力学过程及颗粒成分在线检测方法进行了研究. 搭建了双脉冲激光测量实验系统, 并通过实验对 300 nm Cu 颗粒进行了双脉冲激光实验观测, 通过分析表征颗粒运动轨迹的击穿光谱特征, 从实验上观测到了清洗激光作用后颗粒沿垂直硅片表面向上的运动轨迹. 在综合考虑空气碰撞阻力、颗粒重力的影响下, 建立了激光清洗后颗粒的运动模型, 并与实验相结合求解了运动模型参数, 计算获得了清洗激光作用后颗粒的初始速度和激光作用时间内颗粒的平均加速度. 本文为激光诱导晶圆表面纳米颗粒去吸附以及激光至纳米颗粒动力学过程研究提供了一种模型方法, 也为集成电路污染源在线检测提供了一种重要方法.

**关键词:** 纳米颗粒运动模型, 激光诱导击穿光谱, 激光清洗机理, 成分检测**PACS:** 52.38.Mf, 52.70.Kz, 52.70.Nc**DOI:** 10.7498/aps.69.20200517

## 1 引言

硅片表面纳米级污染颗粒会对集成电路芯片制造带来致命影响, 对其清洗和去除是集成电路制造工业面临的一项重要挑战. 尤其当节点尺寸逐渐减小, 更小尺度的纳米颗粒对芯片性能的影响将逐渐放大, 且传统化学清洗方法效率也会因节点尺寸的减小大大降低. 同时, 当前越来越多的新材料被用到集成电路制造工艺的不同环节中, 这导致可能有更多新材料成分的纳米颗粒污染, 实时监控污染纳米颗粒成分有利于快速确定污染源, 并对各生产环节的问题进行及时预警补救.

激光干法清洗技术 (DLC) 因其环境友好、速度快、易控制等优点成为一种潜在的硅片表面污染

颗粒清洗技术. 激光清洗技术的实际应用所面临的一个主要问题是会对硅片表面造成损伤. 同时, 目前对激光清洗机理仍无定论: 一种认为是激光热膨胀原理, 即激光作用到基体表面, 使其产生热膨胀加速度, 颗粒在热膨胀加速度作用下克服表面吸附力而脱离, 在一定激光功率范围内为弹性膨胀, 不会对硅基体表面造成损伤<sup>[1-3]</sup>; 另一种作用机理是局部场增强效应, 认为由于纳米颗粒的存在, 颗粒底部光场产生局部增强效应, 使得底部基底被快速剥离, 颗粒被瞬间剥离<sup>[4]</sup>; 还有一种说法是因为空气中存在的水分在激光作用下瞬间发生爆炸性气化, 并将颗粒带离表面且不影响. 也有研究者认为这 3 种作用机理同时存在<sup>[5-7]</sup>. 为了对清洗机理有更清晰的认识, 需要研究污染颗粒在激光清洗过程中的受力情况以及颗粒脱离后的运动行为. 然

\* 国家自然科学基金 (批准号: 61404171) 和国家重点研发计划 (批准号: 2019YFB2005600) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: liulituo@ime.ac.cn

而该方面的研究较少. 据调研仅有 Grojo 等<sup>[4]</sup>对激光作用后颗粒的运动轨迹进行了研究, 他们利用飞行时间法通过相机追踪拍摄到了激光作用后颗粒的运动轨迹, 从实验上观测到了激发颗粒的运动行为, 得到了颗粒的速度分布, 研究所用的实验样品表面颗粒浓度达到  $10^9$  个/ $m^2$ , 颗粒之间不可避免存在较强相互作用, 影响其结论的准确性. 国内在激光清洗机理方面的研究还处于初始阶段, 吴东江等<sup>[8]</sup>研究了硅片表面  $Al_2O_3$  颗粒的激光清洗机理, 分析了颗粒半径对清洗效率的影响, 得到了  $1 \mu m$   $Al_2O_3$  颗粒的激光清洗阈值. 谭东晖等<sup>[9,10]</sup>对激光清洗进行了有限元仿真和实验研究, 得到了不同半径油脂激光清洗阈值的仿真与实验相吻合的结论.

为了实时监测不同生产环节的纳米颗粒污染成分, 有很多方法用于检测硅片表面的污染颗粒成分, 如: 电感耦合等离子体质谱法 (ICP)、全反射 X 射线荧光法 (TXRF)、二次离子质谱法 (SIMS). 这些方法都有各自的优缺点<sup>[11-21]</sup>. 激光诱导击穿光谱技术 (LIBS) 是一种直接对物质元素成分进行分析的探测技术, 因其具有快速、高灵敏度、无需样品处理等优点, 已经在很多领域得到成功应用<sup>[22-27]</sup>. 本文提出了一种激光干法清洗结合 LIBS 技术的分析方法, 该方法首先利用激光干法清洗将颗粒加速脱离硅片表面, 然后再利用 LIBS 技术将脱离后的颗粒在硅片表面上方固定位置击穿. 该方法一方面可通过观测原子光谱来追踪颗粒的运动轨迹, 另一方面还可以确定纳米颗粒的元素成分, 在为清洗机理研究提供方法的同时, 还为硅片表面纳米级颗粒成分检测提供了一种实时、快速、无损伤的潜在检测方法.

## 2 纳米颗粒运动模型

本部分将对清洗激光作用后颗粒运动模型进行建模, 当一定功率密度的脉冲激光照射到硅片表面时, 被照射颗粒将获得一初始加速度并克服范德瓦耳斯力脱离硅片表面, 清洗过程及坐标关系如图 1 所示. 本实验设激光脉宽为 ( $\tau$ ) 为 10 ns. 假设激光持续照射时间  $\tau$  内, 范德瓦耳斯力与激光清洗力共同作用的平均加速度为  $a$ , 则颗粒在激光作用结束时刻获得瞬时初始速度 ( $v_0$ ) 为

$$v_0 = a\tau. \quad (1)$$

由于激光作用时间很短, 该时间内颗粒运动位

移可忽略不计, 在激光冲击下获得一速度  $v_0$ , 并在  $v_0$  下将加速脱离硅片表面. 在接下来的过程中, 颗粒将在空气碰撞阻力和重力作用下做减速运动. 空气碰撞阻力与颗粒运动速度和颗粒横截面积相关, 即空气碰撞阻力可表示为

$$F_{air} = AR^2v_t, \quad (2)$$

其中,  $F_{air}$  为空气碰撞阻力,  $A$  为阻力系数,  $R$  为颗粒半径,  $v_t$  为颗粒在  $t$  时刻的运动速度.  $v_0$  由 (1) 式确定, 颗粒在空气阻力和自身重力下做变速运动, 因空气阻力随速度  $v_t$  变化, 其加速度也同样随时间变化, 设  $t$  时刻颗粒加速度为  $a_t$ , 根据牛顿第二定律:

$$a_t = (F_{air} + mg)/m, \quad (3)$$

其中  $m$  为颗粒质量. 速度随时间的变化量  $\Delta v_t$  方程为

$$\Delta v_t = a_t \cdot \Delta t. \quad (4)$$

则瞬时速度:

$$v_t = \int_0^t a_t dt + v_0. \quad (5)$$

联立 (2) 式、(3) 式、(5) 式可得微分方程:

$$\frac{\partial v_t}{\partial t} + \frac{A \cdot R^2}{m} \cdot v_t + g = 0. \quad (6)$$

解 (6) 式可得瞬时速度  $v_t$  为

$$v_t = (v_0 + \beta) \cdot e^{-(t/\beta)} - \beta, \quad (7)$$

其中  $\beta = mg/(A \cdot R^2)$ . 颗粒位移  $s_t$  可表示为

$$s_t = \int_0^t v_t dt = \iint_t a_t dt^2 + \int_0^t v_0 dt. \quad (8)$$

解 (8) 式得:

$$s_t = (v_0 + \beta)\beta \cdot (1 - e^{-t/\beta}) - \beta \cdot t. \quad (9)$$

根据 (7) 式、(9) 式得到  $v-t$  和  $s-t$  关系, (8) 式、(9) 式中颗粒运动位移  $s_t$  是指颗粒脱离硅片  $t$  时刻后的位移, 这个位移是相对于硅片表面而言的. 当颗粒确定后, 除了阻力系数  $A$  和初始速度  $v_0$ , 其他均为已知参数. 上述两未知参数可以通过实验确定.

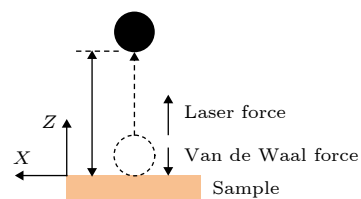


图 1 激光清洗机理示意图

Fig. 1. Schematic diagram of laser cleaning mechanism.

### 3 颗粒追迹与成分探测实验

#### 3.1 实验系统

双脉冲实验系统示意图如图 2 所示, 实验采用波长为 532 nm 双脉冲激光作为光源, 两激光脉宽均为 10 ns. 两脉冲激光器可通过外部延时器控制出光, 两激光器单脉冲最高能量可达 250 mJ. 通过激光器电源控制器控制激光能量输出. 由于实验室条件所限, 本实验所用两台激光器是集成在一起的, 两光束合束后由同一个出光口输出. 本实验用 DG535 信号发生器控制两激光出光延时. 采用偏振棱镜将两束偏振方向不同的光从空间上分离, 其中 P 偏振光作为清洗激光经反射镜 M2、M3 反射后, 再经透镜 L2 聚焦垂直照射到硅片表面. 在光路中加入光阑 D2 以方便限制和调整清洗激光光斑大小. 透镜 L2 焦距为 70 mm, 激光输出能量确定后, 可通过调节 L2 与硅片表面的距离调节照射到硅片表面的功率密度. S 偏振光作为 LIBS 击穿光经 L1 聚焦到硅片表面上方 1.2 mm 处, 且聚焦点尽量位于清洗激光光轴上, 用以击穿经过该位置的运动颗粒产生等离子体. 光阑 D1 同样起到调节和限制激光光斑作用. 样品位于  $xyz$  调节台上, 为保证实验样品的洁净, 免受环境污染, 设计了带有涡轮风机的净化吹风装置, 气流流向实验腔体下方

并维持实验腔的正压状态, 在进行实验时风机处于关闭状态以保证颗粒运动不受空气流动影响. 透镜 L1 焦距为 150 mm, 通过击穿铜板实验得到聚焦光斑直径大小近似为 100  $\mu\text{m}$ . 实验时击穿光能量为 200 mJ, 这样击穿位置激光功率密度达到  $2 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$ . 采用 Andor 光谱仪接收激发的等离子体光谱, 光栅刻线为 1200 line/mm. 整个测量系统时序由 DG535 控制.

#### 3.2 样品制备

实验所用样品为购买于先丰纳米公司的直径为 300 nm 球状 Cu 颗粒. 将粉末状纳米 Cu 颗粒称重后倒入盛有高纯酒精 (纯度 > 99.99%) 的量筒中, 经过稀释、搅拌、超声后配制成一定浓度的悬浊液, 利用一次性滴管取一定量的酒精悬浊液滴到硅片表面, 液滴在表面迅速扩散和自然挥发, 最后硅片表面形成具有一定颗粒浓度的污染区. 在滴管滴定过程中, 尽量保持滴管垂直于硅片表面, 有利于液滴在硅片表面的均匀扩散. 在样品配制过程中, 由于量筒、滴管等容器壁面会黏附纳米颗粒, 最终影响所配样品的准确性, 因此需要进行超声震荡, 同时应尽量减少样品在量筒、滴管中的存放时间. 本实验配制一次样品的时间保持在 20 min 以内. 通过以上步骤配制了 5 种不同浓度的样品, 如表 1 所示.

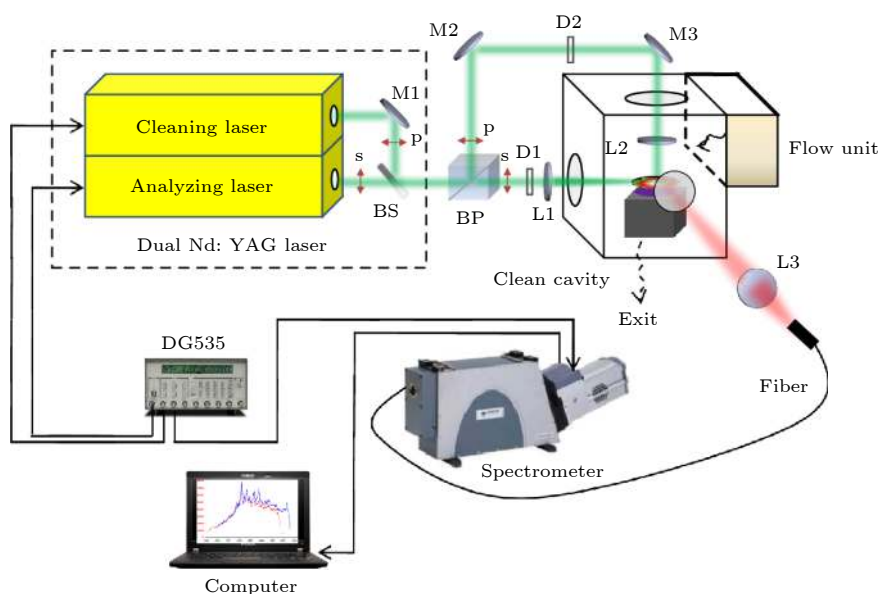


图 2 实验系统示意图

Fig. 2. Schematic diagram of experimental system.

表 1 5 种不同浓度样品

Sample No.	1	2	3	4	5
Concentration/ $10^{13}$ atoms $\cdot$ cm $^{-2}$	152	76	38	5.1	2.1

## 4 实验结果与分析

### 4.1 硅片损伤阈值

激光清洗一个重要问题就是对基体表面的损伤. 为了更有效地将颗粒激发脱离硅片表面, 往往采用较大的激光照射功率密度, 然而, 激光功率密

度太高会对硅片基体表面造成损伤, 需要通过实验来确定硅片的损伤阈值. 通过改变样品台的高度, 可以改变清洗激光照射到硅片表面的功率密度. 图 3 为通过 SEM 获得的 5 个不同样品台高度下激光辐照不含颗粒硅片表面的情况, 顶部未全部显示圆斑为标记起始位置, 其作用是方便显微镜定位观测位置. 可以发现 1—3 黄色标记点都存在不同程度的激光损伤, 第 4 个黄色标记点损伤已不明显, 第 5 个红色标记点明显不存在损伤. 表 2 为 5 个位置的对应激光功率密度. 可以认为硅片基体本身的击穿阈值在  $1.11 \times 10^8$ — $1.21 \times 10^8$  W/cm $^2$  之间.

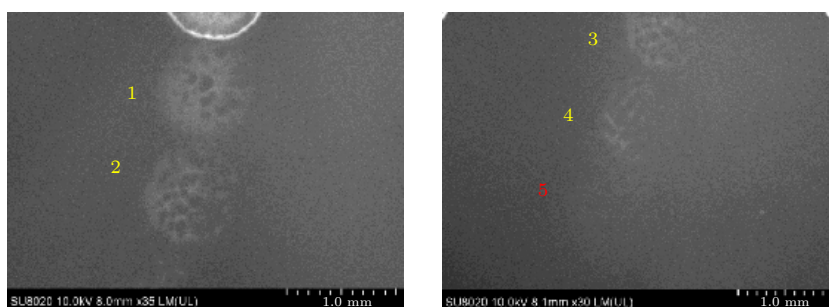


图 3 硅片损伤阈值 SEM 图

Fig. 3. SEM image for breakdown threshold of silicon wafer.

表 2 硅片击穿阈值实验结果

Table 2. Experimental results of silicon wafer damage threshold.

Spots No.	1	2	3	4	5
Power density/ $10^8$ W $\cdot$ cm $^{-2}$	1.64	1.52	1.32	1.21	1.11

### 4.2 硅片表面颗粒清洗阈值

当硅片表面附着污染颗粒时, 其对硅片表面的损伤阈值会比没有污染颗粒时低, 原因是纳米颗粒对光场的微扰动, 使均匀入射光场在颗粒扰动下的强度重新分布的不均匀性造成的<sup>[4]</sup>. 利用清洗激光照射不同高度位置的含颗粒硅片表面, 观测不同功率密度下颗粒的清洗效果及损伤情况. 为了增强 3D 成像效果, 采用了共焦显微镜进行实验观测. 图 4(a)—(c) 为激光功率密度分别在  $10 \times 10^7$ ,  $8 \times 10^7$ ,  $6 \times 10^7$  W/cm $^2$  下的清洗效果图, 为了提高激光作用印记的对比度, 采用灰度图显示激光作用区域范围. 同时, 采用彩色图来增强局部放大 20 倍后显示的 3D 凹凸效果. 图 4(a) 是在激光功率密度

为  $10 \times 10^7$  W/cm $^2$  下的激光清洗结果, 从图 4(a) 左图中可以看到, 激光作用轮廓清晰可见, 清洗圆斑轮廓内的灰黑色印记表明激光对硅片造成了损伤. 放大后如图 4(a) 右图所示, 可以看到激光对存在颗粒处基体产生了凹坑损伤, 而无颗粒的硅片表面位置无凹坑损伤现象, 这充分说明了颗粒的存在造成硅片损伤阈值下降. 当激光功率密度继续降低到  $8 \times 10^7$  W/cm $^2$  和  $6 \times 10^7$  W/cm $^2$  时, 如图 4(b) 和图 4(c) 的左图都未出现明显损伤, 对应右侧放大彩图可以观测到 Cu 颗粒状突起, 无颗粒的基体空白处未发现损伤. 说明将激光功率降低后, 未出现损伤, 但激光清洗效率会降低. 同时发现图 4(b) 颗粒密度低于图 4(c), 这说明在这两个激光功率密度下, 部分颗粒被剥离, 且未对基体造成损伤. 后面的实验光谱数据分析也可以证实这一点. 可以推测, 在激光能量处于  $8 \times 10^7$ — $10 \times 10^7$  W/cm $^2$  之间一定存在一个最优的激光功率值, 可在不损伤基体表面的情况下使得颗粒清洗效率最大. 据此, 本实验在激光功率密度为  $8 \times 10^7$  W/cm $^2$  的情况下进行.

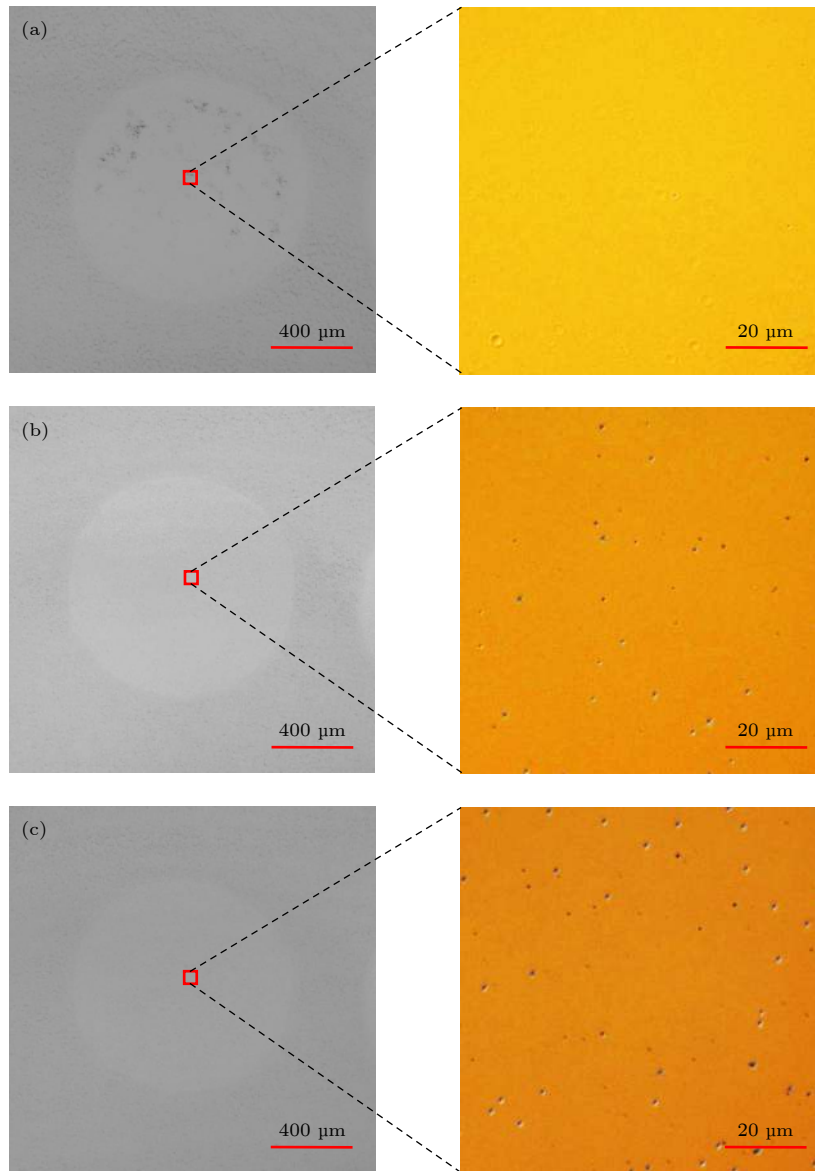


图 4 不同激光功率密度下共焦显微镜拍摄图像 (a)  $10 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ ; (b)  $8 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ ; (c)  $6 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$

Fig. 4. Confocal microscope images under different laser power densities: (a)  $10 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ ; (b)  $8 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ ; (c)  $6 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ .

### 4.3 延时实验

#### 4.3.1 LIBS 光谱采集延时

当激光击穿颗粒产生等离子体后, 需要利用光谱仪收集信号, 很多研究已经表明, LIBS 光谱具有时间演化特性, 激光激发等离子体的起始时刻多为自由电子韧致辐射产生的背景噪声, 相隔一定时间后才会出现信噪比较大的物质光谱信息. 这一特性与所测物质本身和环境相关. 为了确定 Cu 的激光等离子体演化时间特征, 选用铜板进行 LIBS 实验研究, 即利用图 2 中水平入射激光击穿铜板. 选

取 Cu I 427.3 nm 原子发射谱线强度作为等离子体演化分析目标. 结果如图 5 所示, 在大约 1.02  $\mu\text{s}$  处谱线强度达到最大值, 在如下实验中, 光谱仪的采集延时均设置为 1.02  $\mu\text{s}$ .

#### 4.3.2 DLC 与 LIBS 实验

为了降低实验操作难度, 本实验通过固定图 2 中透镜 L2 到硅片表面的距离及击穿高度, 改变 DLC 触发与 LIBS 触发的延时, 并利用 (3) 式所建模型来得到颗粒脱离后的运动轨迹. 由于颗粒是在空气环境下被击穿, 因此在等离子体中存在很多来自于空气击穿的谱线, 这些谱线会干扰到 Cu 实验

测量. 图 6 为纯空气击穿与样品在空气环境中击穿的对比图, 为了避开空气的干扰, Cu I 324.7 nm 和 I 327.4 nm 被选为分析谱线.

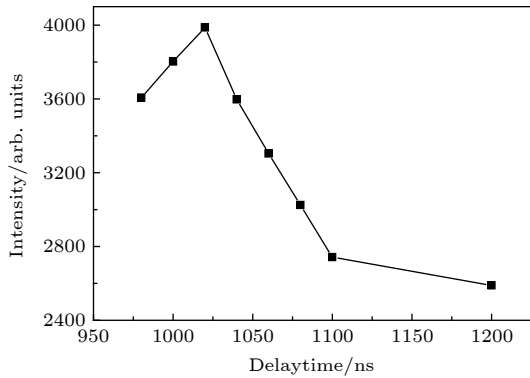


图 5 铜板 LIBS 时间演化特征

Fig. 5. Time evolution features of LIBS from copper plate.

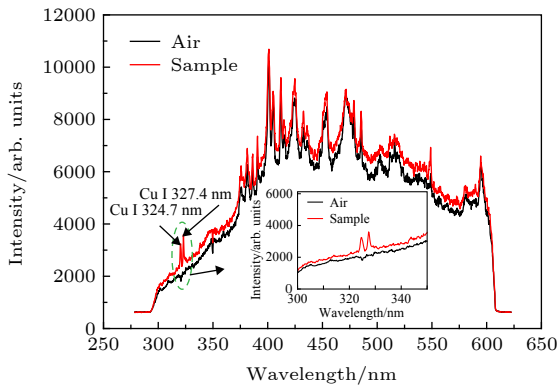


图 6 空气与样品的 LIBS 实验结果

Fig. 6. LIBS experimental results of air and the sample.

在保持击穿高度不变的情况下, 通过改变双脉冲激光延时可以得到激发颗粒的运动轨迹. 在不同延时下进行了双脉冲实验研究, 采集 Cu 原子谱线两峰值扣除背景后随双脉冲延时的变化如图 7 所示, 图 7(a) 为延时时间 ( $T$ ) 从 0—1 ms 之间, 光谱峰值强度的变化趋势. 图 7(b) 为延时从 0—30 ms 的峰值强度变化趋势, Cu 的两个谱峰都分别在 1 ms 和 15 ms 位置出现峰值, 这意味着 Cu 颗粒分别两次穿过击穿聚焦点位置. 第一次为在颗粒受激发 1 ms 后以较快的速度向上运动达到击穿区域, 第二次为在 15 ms 后颗粒因重力重新返回击穿区域, 此时速度慢于第一次穿越时的速度. 15 ms 以后, 越来越少的颗粒穿过击穿区域. 这说明, 当清洗激光作用到硅片表面后, 颗粒在 10 ns 时间内受清洗力被激发脱离硅片表面, 之后在空气阻力和重力作用下做减速运动, 并在

1 ms 时第一次到达击穿位置, 到达最高点后做自由落体运动, 在 15 ms 时回到击穿位置, 之后继续往下运动. 从图 7(b) 可以看到, 在 1 ms 时出现的第一个峰值高于 15 ms 时峰值, 可能原因是颗粒向上运动速度分布是发散的, 造成回落的颗粒密度降低. 因击穿高度为实际的颗粒位移, 固定为 1.2 mm, 将两峰值时刻代入运动方程 (9) 式可得到参数  $A$  和  $v_0$  分别为  $5.8 \times 10^2 \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}^3$  和 7.6 m/s, 根据 (1) 式清洗激光作用过程中颗粒的初始平均加速度  $a = 7.6 \times 10^8 \text{ m}/\text{s}^2$ .

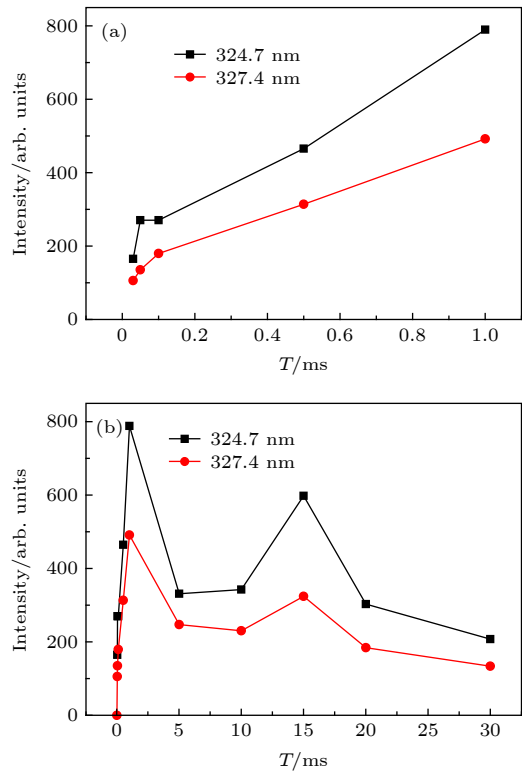


图 7 样品 1 的延时实验结果 (a) 0—1 ms, (b) 0—30 ms

Fig. 7. Delay time experimental results of sample 1:

(a) delay time is 0—1 ms, (b) delay time is 0—30 ms.

根据以上分析, 在 1 ms 时, 谱线强度达到最大值, 可以认为两脉冲激光的最佳延时时间为 1 ms. 在该最佳延时下, 对表 1 中不同颗粒浓度的样品进行了实验. 结果如图 8 所示. 图 8(a) 显示, 谱线强度随着颗粒浓度增大而增大, 当颗粒浓度为  $2.1 \times 10^{13} \text{ atoms}/\text{cm}^2$  时, 对应的光谱强度几乎淹没在噪声里. 图 8(b) 为选取谱线峰值周围 3 个数据点积分的结果, 更清晰的显示了光谱强度随颗粒浓度的变化规律. 据此, 可以认为颗粒浓度在  $5.1 \times 10^{13} \text{ atoms}/\text{cm}^2$  之上时探测系统均有较明显的光谱响应.

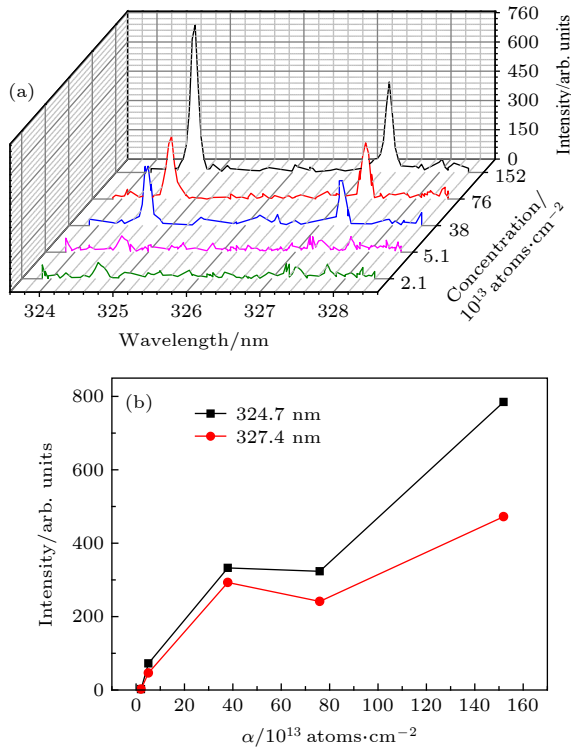


图 8 延时为 1 ms 时不同 Cu 颗粒浓度样品实验结果 (a) 三维光谱强度; (b) 峰值光谱强度

Fig. 8. Experimental results of Cu particles with different concentrations when delay time was 1 ms: (a) 3D spectral intensity; (b) peak of spectral intensity.

## 5 结 论

通过实验我们观测到颗粒被清洗激光激发脱离后,首先在空气阻力和重力作用下做减速运动,运动到最高点速度为零后,在重力和空气阻力作用下继续做加速运动.建立了颗粒脱离后的运动模型,并通过实验获得了模型的参数.得到了在清洗激光作用后的初始速度和初始平均加速度分别为 7.6 m/s 和  $7.6 \times 10^8$  m/s $^2$ . 研究表明,在颗粒脱离后的运动过程中,其速度矢量具有一定发散角,且整个运动过程中重力不可忽略.系统对颗粒浓度高于  $5.1 \times 10^{13}$  atoms/cm $^2$  的污染硅片均有较灵敏的响应.本实验是在清洗激光功率密度为  $8 \times 10^7$  W/cm $^2$  的情况下进行的,该值并非最优的功率密度值.需要进一步通过实验优化清洗激光功率密度值,在不损伤硅片的情况下进一步提高清洗效率.本文的研究不仅为激光清洗机理研究提供一种理论分析方法,而且为集成电路硅片表面纳米级颗粒缺陷成分的在线检测提供了一种潜在方法.

## 参考文献

- [1] Zapka W, Ziemlich W 1991 *Appl. Phys. Lett.* **58** 2217
- [2] Hsu S C, Lin J 2006 *Optics & Laser Technol.* **38** 544
- [3] Arnold N 2003 *Appl. Surf. Sci.* **208** 15
- [4] Grojo D, Cos A, Delaporte P, Sentis M 2006 *Appl. Phys. B* **84** 517
- [5] Mosbacher M, Münzer H J, Zimmermann J, Solis J, Boneberg J, Leiderer P 2001 *Appl. Phys. A* **72** 41
- [6] Mosbacher M, Dobler V, Bertsch M, Munzer J, Boneberg J, Leiderer P 2003 *Surf. Contam. Clean.* (Vol. 1) (Konstanz: KOPS Press) p17
- [7] Seo C, Shin H, Kim D. 2018 *Laser Technol.: Applications in Adhesion and Related Areas* (Beverly: Scrivener Publishing LLC) pp379–416
- [8] Wu D J, Xu Y, Wang X Y, Kang R K, Si M Y, Hu L Z 2006 *Optics and Precision Engineering* **14** 765 (in Chinese) [吴东江, 许媛, 王续跃, 康仁科, 司马媛, 胡礼中 2006 光学精密工程 **14** 765]
- [9] Tan D H, Lu D S, Song W D, Fan Y C, An C W 1995 *Laser Technol.* **19** 319 (in Chinese) [谭东晖, 陆冬生, 宋文栋, 范永昌, 安承武 1995 激光技术 **19** 319]
- [10] Tan D H, Lu D S, Song W D, An C W 1996 *J. Huazhong Univ. Sci. Technol.* **24** 50 (in Chinese) [谭东晖, 陆冬生, 宋文栋, 安承武 1996 华中理工大学学报 **24** 50]
- [11] Meredith B, Scott A 2010 *Microelectron. Eng.* **87** 1701
- [12] Chowdhury V, Simionas D, Fu K, Huang J, Sun P 2018 *29th Annual SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference (ASMC)* New York, USA, April 30–May 3, 2018 p1109
- [13] Chakraborty S, Luz Manalo M, Moideen Ali J, Armin G, Joel B 2017 *7th international Conference on Silicon Photovoltaics, SiliconPV Freiburg*, Germany, April 3–5, 2017 p24
- [14] Ferlito E P, Alnabulsi S, Mello D 2011 *Appl. Surf. Sci.* **257** 9925
- [15] Polignano M L, Borionetti G, Galbiati A, Grasso S, Mica I, Nutsch A 2018 *Spectrochim. Acta, Part B* **2** 117
- [16] Ohno R, Saga K 2018 *Solid State Phenom.* **282** 309
- [17] Danel A, Sage S, Barnes J P, Peters D, Spicer R, Bryant R, Newcomb R 2009 *Microelectron. Eng.* **86** 186
- [18] Budri T 2008 *Appl. Surf. Sci.* **254** 4768
- [19] Zanderigo F, Ferrari S, Queirolo G, Pello C, Borgini M 2000 *J. Mater. Sci. Eng. B* **73** 173
- [20] Yang C K, Chi P H, Lin Y C, Sun Y C, Yang M H 2010 *Talanta* **80** 1222
- [21] Rostam-Khani P, Hopstaken M J P, Vullings P, Noij G, Halloran O O, Claassen W 2004 *Appl. Surf. Sci.* **231** 720
- [22] Salvatore A, Luisa C, Francesco C, Violeta L, Giorgio M, Pierandrea M, Antonio P, Andrea R, Pawel G, Wojciech G, Monika K 2020 *Fusion Eng. Des.* **157** 111685
- [23] Millar S, Kruschwitz S, Wilsch G 2019 *Cem. Concr. Res.* **117** 16
- [24] Guo L B, Cheng X T, Yun T, Shi S H, Zhong Q L, Lu X Y, Zeng Y F, Xiao Y 2019 *Spectrochim. Acta, Part B* **152** 38
- [25] Xian H, Bakker M C M 2014 *Talanta* **120** 239
- [26] Davari S A, Taylor P A 2019 *Talanta* **18** 192
- [27] Romero D, Romero J M F, Laserna J J 1999 *J. Anal. At. Spectrom* **14** 199



# Study of nano particle stripping and composition inspection on wafer surface\*

Liu Li-Tuo<sup>1)†</sup> Wang Chun-Long<sup>2)</sup> Yu Xiao-Ya<sup>3)</sup> Shi Jun-Kai<sup>1)</sup>  
Li Yao<sup>1)</sup> Chen Xiao-Mei<sup>1)</sup> Zhou Wei-Hu<sup>1)</sup>

1) (*Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China*)

2) (*Liberation Army 32180, Beijing 100012, China*)

3) (*Key Laboratory of Experimental Physics and Computational Mathematics, Beijing 100094, China*)

( Received 8 April 2020; revised manuscript received 14 May 2020 )

## Abstract

Nano-scale particle stripping and inspection on silicon wafer are critical issues for Integrated Circuit(IC) manufacture industry. As more new materials are used in IC manufacture, not only particle itself but also its composition should be inspected. Particles are mainly adhered by the van der waals force. One of potential particle desorption method is laser cleaning which is environment friendly. However, the mechanism of laser cleaning is not clear and more studies should be done for laser ablation. In this paper, the kinetic process of nano particle on silicon wafer induced by nanosecond pulsed laser as well as the on-line detection method of particle composition were studied. A potential method of nano particle dynamic analysis and particle composition inspection were presented. A dual nanosecond pulse laser system both wavelengths at 532 nm is designed in which one laser pumps the particles away from wafer surface almost without damage, the other laser breakdowns the particles in air above the wafer surface to obtain the emission lines of the contaminated particles of 300 nm Cu by a spectroscopy with CCD. Particle motion trail in  $z$  direction was observed after laser cleaning by analyzing particle spectral features. The particle dynamic model after stripping was established in which the resistance of air collision and gravity were included. And the model parameters were obtained by calculation using experimental results. The initial velocity of particle at the end of laser pulse and the average acceleration during laser interaction were calculated which were 7.6 m/s and  $7.6 \times 10^8$  m/s<sup>2</sup> respectively. The sensitivity of the dual laser system was evaluated which was between  $2.1 \times 10^{13}$  to  $5.1 \times 10^{13}$  atoms/cm<sup>2</sup>. As result, it is found that the gravity of the particle should not be ignored and the velocity divergence between different stripping particles is existed. The study not only provides a methodology for the study of laser-induced removal of nano particles on the wafer surface and laser induced nano particle dynamics, but also provides a potential method for the inspection of particle composition and pollution source monitoring on line in integrated circuit manufacture process. As the results were not the optimum one and further study should be done in which a better laser power density should be used.

**Keywords:** dynamic model of nano particle, laser induced breakdown spectroscopy, laser cleaning, composition inspection

**PACS:** 52.38.Mf, 52.70.Kz, 52.70.Nc

**DOI:** [10.7498/aps.69.20200517](https://doi.org/10.7498/aps.69.20200517)

\* Projected supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61404171) and the National Key R&D Program of China (Grant No. 2019YFB2005600).

† Corresponding author. E-mail: [liulituo@ime.ac.cn](mailto:liulituo@ime.ac.cn)