

压电式高温液滴喷射元件研制

邹凯^{1,2}, 张文斌², 关胜², 孙海轶³, 彭凯伦³, 邹家杰³,
李学红³, 王成³, 冷雨欣³, 梁瑞虹², 周志勇²

(1. 中国科学院大学, 北京 100049; 2. 中国科学院 上海硅酸盐研究所, 上海 200050; 3. 中国科学院 上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要: 极紫外(Extreme ultra-violet, EUV)光刻机光源主要采用激光产生等离子体技术, 用高功率激光轰击锡液滴靶产生 13.5 nm 波长的 EUV 光。其中, 基于逆压电效应的压电式高温锡液滴喷射元件是获取高重频高温锡液滴靶的关键部件。本项工作突破了耐 250 °C 高温微细压电陶瓷管的组成设计和精细制备, 以及高温锡液滴喷射元件的结构设计和封装等关键技术, 成功研制了压电式高温液滴喷射元件。并通过自主搭建高温锡液滴靶光学检测平台, 基于此高温液滴喷射元件实现了重复频率 20 kHz, 直径~100 μm 的高温锡液滴靶的稳定输出。

关键词: 极紫外光刻; 微细压电陶瓷管; 高温液滴发生器; 高温压电陶瓷

中图分类号: TQ174 文献标志码: A

Piezoelectric High Temperature Liquid Droplet Spraying Component

ZOU Kai^{1,2}, ZHANG Wenbin², GUAN Sheng², SUN Haiyi³, PENG Kailun³, ZOU Jiajie³,
LI Xuehong³, WANG Cheng³, LENG Yuxin³, LIANG Ruihong², ZHOU Zhiyong²

(1. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 2. Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China; 3. Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract: Extreme Ultra-Violet (EUV) lithography utilizes Laser Produced Plasma (LPP) technology to generate EUV light with a 13.5 nm wavelength by bombarding tin liquid droplets with high-power lasers. Piezoelectric high-temperature nozzle based on inverse-piezoelectric effect is the key component for obtaining high-frequency tin droplet targets. Here, breakthroughs have been made in the composition design, fine preparation of high-temperature micro piezoelectric ceramic tubes that can withstand temperatures up to 250 °C, and structure design, fabrication and precise driving control of the piezoelectric high-temperature nozzle. Based on a self-constructed high-temperature tin droplets generation platform, a stable output of high-temperature tin droplet targets with repetition frequency of 20 kHz and diameter of 100 μm is successfully achieved.

Key words: EUV lithography; micro piezoelectric ceramic tube; piezoelectric high-temperature nozzle; high-temperature piezoelectric ceramic

集成电路是当今信息社会的基石, 也是人类工
业文明的集大成者。用于制备芯片的光刻技术则是

集成电路领域的核心技术。为满足人工智能、云计
算、大数据等领域对处理器越来越高的算力需求,

收稿日期: 2023-03-16; 收到修改稿日期: 2023-04-07; 网络出版日期: 2023-04-11

基金项目: 上海市科委集成电路科技支撑专项项目(20501110100)

Integrated Circuit Technology Support Special Project of Science and Technology Innovation Action Plan of Shanghai (20501110100)

作者简介: 邹凯(1997-), 男, 博士研究生. E-mail: zoukai19@mailsucas.ac.cn

ZOU Kai (1997-), male, PhD candidate. E-mail: zoukai19@mailsucas.ac.cn

通信作者: 周志勇, 研究员. E-mail: zyzhou@mail.sic.ac.cn

ZHOU Zhiyong, professor. E-mail: zyzhou@mail.sic.ac.cn

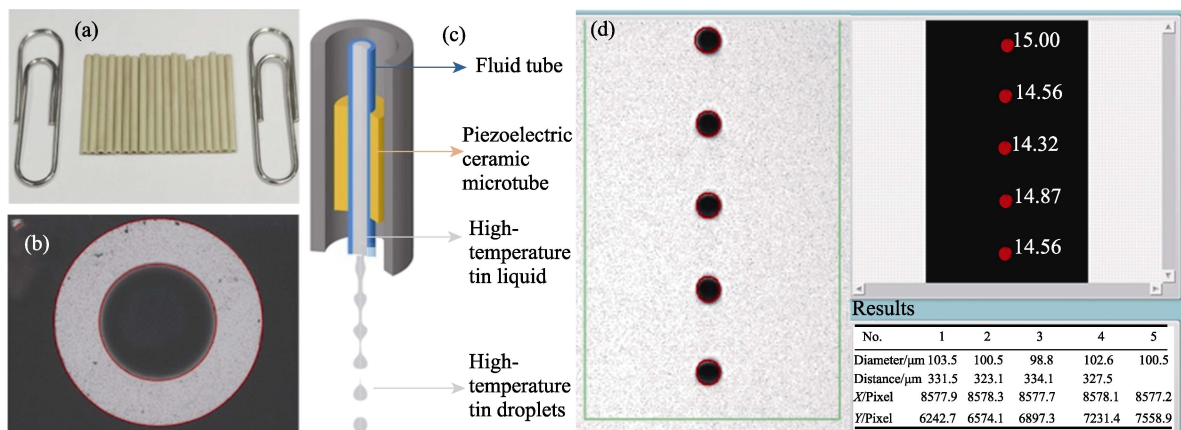


图 1 微细压电陶瓷管的实物照片(a)和截面形貌(b), 压电式高温锡液滴喷射元件示意图(c), 20 kHz 正弦电压驱动产生的高温锡液滴靶(d)

Fig. 1 Photo (a) and cross-sectional SEM image (b) of micro piezoelectric ceramic tubes, schematic (c) of high-temperature piezoelectric nozzle, and experiment results (d) of tin droplet trained with 20 kHz generation frequency

芯片制程不断下探, 从 28 nm 到 14 nm, 再到全面迈向 7 nm 及以下节点^[1-3]。在芯片制造过程中, 制程尺寸越小, 制造精度就越高, 传统的深紫外($\lambda = 193 \text{ nm}$)光刻技术已经无法满足这些要求。EUV 光刻使用波长更短、能量更高的 EUV 光($\lambda = 13.5 \text{ nm}$)作为曝光光源, 可以实现更高的分辨率和更小的制程尺寸。因此, EUV 光刻已成为实现更小制程节点的首选技术^[4-5]。

EUV 光源是 EUV 光刻系统中重要的组成部分, 高功率、稳定的光源将为整体系统的稳定工作奠定基础。EUV 光源主要通过放电等离子体和激光等离子体获得, 其中激光等离子体 EUV 光源以其功率可拓展、极紫外辐射收集效率高等特性, 成为当前量产光刻机用高功率 EUV 光源的解决方案之一^[6-7]。激光等离子体采用高功率短脉冲激光轰击锡液滴靶, 产生等离子体以辐射 EUV 光。均匀、稳定、小尺寸的高频锡液滴靶是获取高质量 EUV 光源的关键^[7-8]。

基于逆压电效应的压电式高温液滴喷射元件是获取高质量锡液滴靶的首选方案, 其核心功能元件耐高温微细压电陶瓷管的典型特点是耐高温($>240 \text{ }^\circ\text{C}$)、高性能(压电系数 $d_{33} > 350 \text{ pC/N}$)、大长径比(长径比 >20)和薄壁(0.2~0.8 mm)。其中, 微细压电陶瓷管的精细制备是关键技术难点。中国科学院上海硅酸盐研究所压电陶瓷材料与器件研究团队基于自主研制的 PZT 高温压电陶瓷材料, 突破了微细压电陶瓷管的成型、烧结、加工、极化和性能测试等一系列核心技术, 成功研制出耐 $250 \text{ }^\circ\text{C}$ 高温的微细压电陶瓷管, 同心度、线性度等均达到国外同类产品水平, 分别如图 1(a, b)所示。基于射流断裂原理^[9], 通过电压驱动微细压电陶瓷管产生的径向振动对射流产生周期性扰动, 形成均匀、稳定的锡液滴靶。

在此基础上, 联合中国科学院上海光学精密研究所 EUV 光源团队, 解决了压电式高温锡液滴喷射元件的密封组装与高温真空气密性等关键问题, 实现了压电式高温锡液滴喷射元件的自主制备, 如图 1(c)所示。利用中国科学院上海光学精密研究所自主搭建高温锡液滴喷射平台进行性能验证, 实验结果表明喷射元件可满足锡液滴的喷射应用。图 1(d)为在 20 kHz 正弦波电压驱动下所产生的高温锡液滴靶及尺寸大小, 液滴呈规整球形, 尺寸均匀($\sim 100 \mu\text{m}$)且液滴间距稳定($\sim 300 \mu\text{m}$), 证实该压电高温锡液滴喷射元件可以在 $250 \text{ }^\circ\text{C}$ 高温环境中稳定工作。高温锡液滴喷射元件及其关键-微细压电陶瓷管制备技术的突破为 EUV 光源国产化夯实了基础。项目团队将继续深入合作, 推动压电高温锡液滴喷射元件在 EUV 光源和光刻领域的工程应用。

参考文献:

- [1] WAGNER C, HARNED N. Lithography gets extreme. *Nat. Photonics*, 2010, **4**(1): 24.
- [2] BASKO M M, KRIVOKORYTOV M S, *et al.* Fragmentation dynamics of liquid-metal droplets under ultra-short laser pulses. *Laser Phys. Lett.*, 2017, **14**(3): 036001.
- [3] HUTCHESON G D. Moore's law, lithography, and how optics drive the semiconductor industry. *Proceedings of SPIE*, 2018, **10583**(4): 1058303.
- [4] 林楠, 杨文河, 陈韞懿, 等. 极紫外光刻光源的研究进展及发展趋势. *激光与光电子学进展*, 2022, **59**(9): 0922002.
- [5] 黄超, 马连英, 朱峰, 等. 陶瓷表面放电光泵浦源放电特性研究. *中国光学*, 2019, **12**(6): 1321.
- [6] ABRAMENKO D B, ANTSIFEROV P S, ASTAKHOV D I, *et al.* Plasma-based sources of extreme ultraviolet radiation for lithography and mask inspection. *Uspekhi Fiz. Nauk*, 2019, **189** (3): 323.
- [7] YANG D K, WANG D, HUANG Q S, *et al.* The development of laser-produced plasma EUV light source. *Chip*, 2022, **1**(3): 100019.
- [8] HU L, SHE L, FANG Y, *et al.* Deformation characteristics of droplet generated by Rayleigh jet breakup. *AIP Adv.*, 2021, **11**(4): 045310.
- [9] MOALLEMI N, LI R, MEHRVARAN K. Breakup of capillary jets with different disturbances. *Phys. Fluids*, 2016, **28**(1): 012101.
- [10] ROLLINGER B, ABHARI R S. Excitation and dynamics of liquid tin micrometer droplet generation. *Phys. Fluids*, 2016, **28**(7): 074105.