

基于阴影法的脉冲 CO₂ 激光 Sn 等离子体羽辉 膨胀特性研究

吴涛¹ 王新兵^{2*} 王世芳³ 谭荣¹

¹武汉工程大学理学院, 湖北 武汉 430074
²华中科技大学武汉光电国家实验室, 湖北 武汉 430074
³湖北第二师范学院物理与电子信息学院, 湖北 武汉 430205

摘要 基于阴影法测量了脉冲 CO₂ 激光 Sn 等离子体羽辉在缓冲气体中的膨胀特性, 得到了羽辉边界位置及其等离子体碎屑动能随延时的变化规律, 并利用修正的阻力扩散模型拟合了实验数据。研究表明, 在入射激光脉冲能量为 400 mJ, 脉冲半峰全宽为 75 ns, 缓冲空气气压为 1000 Pa 时, 初期(延时小于 100 ns) Sn 等离子体羽辉边界的膨胀速度可以达到 3 cm/ μ s, 随着延时的增加, 由于背景气体分子的热碰撞阻力作用, 羽辉粒子的速度急剧下降, 后期(延时大于 800 ns)羽辉碎屑离子膨胀速度降到了 0.3 cm/ μ s。修正的阻力扩散模型拟合的结果表明等离子体羽辉膨胀的极限尺寸 $x_{st} = 15.2$ mm, 实验测试结果表明, 羽辉碎屑粒子运动的极限距离约为 16 mm, 理论模型与实验结果吻合较好。

关键词 激光光学; 激光等离子体; 羽辉膨胀; 阴影法; 缓冲气体

中图分类号 O53 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201340.0102003

Research on Pulsed CO₂ Laser Produced Sn Plasma Plume Expansion Properties by Shadowgraph Technique

Wu Tao¹ Wang Xinbing² Wang Shifang³ Tan Rong¹

¹School of Science, Wuhan Institute of Technology, Wuhan, Hubei 430074, China

²Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China

³School of Physics and Electronic Information, Hubei University of Education, Wuhan, Hubei 430205, China

Abstract The characteristics of pulsed CO₂ laser produced Sn plasma plume expansion under ambient air pressures are studied by shadowgraph technique. The dependences of Sn plume expansion position and plasma debris energy on delay time are obtained. The modified drag diffusion model is employed to fit the experimental data. Plasmas are generated by irradiating planar Sn targets using 400 mJ, 75 ns pulses from a CO₂ laser. Our results show that the estimated expansion velocity of the plasma in the early stage (delay time is less than 100 ns) is almost 3 cm/ μ s, and decreases rapidly with delay time to about 0.3 cm/ μ s at later stage (delay time is larger than 800 ns) because of the thermalization collisions with buffer gas pressure of 1000 Pa. Fitting results of modified drag diffusion model indicate that the plasma plume maximum size is $x_{st} = 15.2$ mm, which is found to agree fairly well with the measured data of 16 mm.

Key words laser optics; laser produced plasmas; plume expansion; shadowgraph; buffer gas

OCIS codes 140.3440; 280.5395; 350.5400

收稿日期: 2012-07-25; 收到修改稿日期: 2012-09-17

基金项目: 油气藏地质及开发工程国家重点实验室开放基金(PLN1205)、国家自然科学基金(61078024)及国家自然科学基金(11104211)资助课题。

作者简介: 吴涛(1980—), 男, 博士, 讲师, 主要从事激光等离子体方面的研究。E-mail: wtwsfwzy@126.com

* 通信联系人。E-mail: wtlaser@126.com

1 引 言

随着光刻分辨率的不断提高,带给半导体芯片光刻技术的挑战越来越大^[1]。作为传统光刻技术的延续,中心波长为 13.5 nm 的极紫外光刻(EUVL)目前被国际上广泛认为是下一代光刻(NGL)最有前途的方法,因为它向人们提供了成功突破 22 nm 节点的最佳途径^[2~5]。最近的研究表明,脉冲 CO₂ 激光诱导锡(Sn, Tin)靶产生等离子体极紫外辐射(LPP-EUV)光源具有高转换效率(CE)和低碎屑的特点,被国际上普遍认为是 NGL-EUVL 最有竞争力的光刻机光源^[6~10]。高效、清洁的极紫外光源要求激光等离子体在具有较高的极紫外转换效率的同时,还要尽可能地减小等离子体碎屑的能量及产量。激光等离子体羽辉的膨胀动力学特性的研究对于理解等离子体碎屑的产生及抑制具有重要意义。

减缓和抑制激光等离子体光源中的碎屑,从而延长 EUV 收集镜及光刻系统的寿命是极紫外光刻光源技术的一个重要课题。在光源和 EUV 收集镜之间充入缓冲气体,不仅可以抑制/减缓带电离子碎屑,也能减缓激光等离子体中的中性原子或小尺度颗粒/团簇等碎屑。实践证明,利用缓冲气体来减缓高能粒子的动能是一种有效的手段^[11,12]。利用高速成像诊断技术可以测试评估缓冲气体对等离子体碎屑的减缓、抑制效率,为设计优化缓冲气体在光源碎屑抑制消除装置方面提供依据和参考。阴影法作为一种成像诊断技术广泛应用于流动显示领域,主

要用于流场的定性定量分析。脉冲激光诱导靶材会产生一种瞬变的等离子体流场,不均匀的等离子体流场存在密度梯度,等离子体流场各处折射率不同,探测光经过等离子体流场和冲击波波前处发生偏折,并改变电荷耦合器件(CCD)上的光强分布,CCD 把光强分布转换为明暗不同的阴影图像,通过时间分辨的阴影图像即可有效记录等离子体羽辉边界的演化过程。本文采用阴影法测量了缓冲气体中脉冲 CO₂ 激光 Sn 等离子体羽辉的膨胀过程,利用增强型 CCD(ICCD)记录下了羽辉在缓冲气体中膨胀的时间分辨的二维(2D)影像图,通过对阴影图的分析及处理,得到了羽辉边界随时间的演化,并利用修正的阻力扩散模型拟合了实验数据,吻合较好。

2 实验装置

实验装置示意图如图 1 所示,脉冲 CO₂ 激光经 ZnSe 晶体窗口射入安装在真空靶室内的 ZnSe 聚焦透镜,聚焦透镜的焦距为 $f=9.525$ cm,激光脉冲垂直入射聚焦于靶材表面上形成等离子体。靶材为平板纯锡靶(纯度大于 99.9%),几何形状为圆形,厚度为 4 mm,直径为 4 cm,固定在步进电机的旋转靶架上,能够精确地控制旋转以消除重复射击同一点而形成凹坑造成的影响。激光脉冲光束通过两个准直光阑,利用步进电机控制 ZnSe 聚焦透镜的轴向精确移动,获得最小的焦斑大小约为 200 μm。激光脉冲能量通过能量计(Gentec ED500)测量,脉冲激

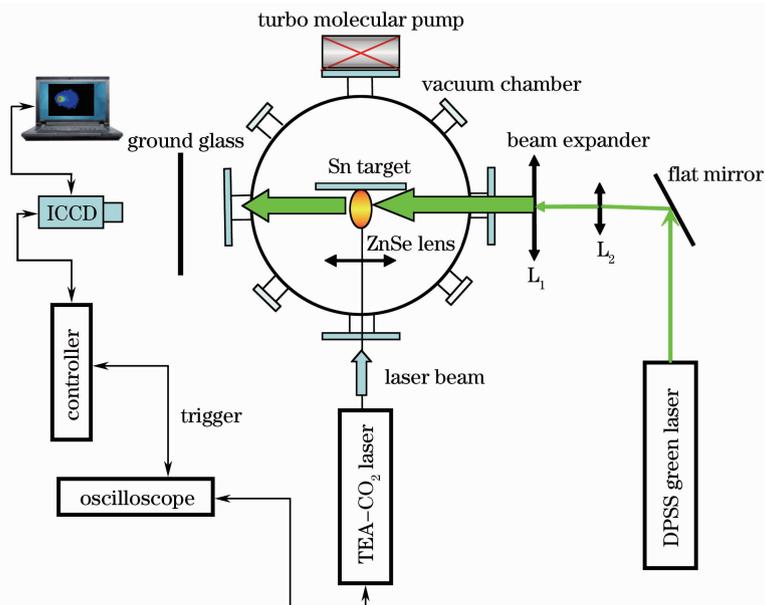


图 1 阴影法测试实验装置示意图

Fig. 1 Basic experimental configuration and detailed view of the apparatus used for shadowgraph

光时域波形利用光子牵引探测器与示波器记录测量。平板 Sn 靶放置在可充、抽气的真空腔靶室内，真空靶室通过机械泵和涡轮分子泵可以将气压控制在 $10^{-4} \sim 10^5$ Pa 范围内变化。

利用时间分辨型 ICCD 相机 (PI-MAX-1300) 对羽辉影像高速成像，可以得到等离子体羽辉的形状和空间轮廓随延迟时间的演化过程，通过对羽辉膨胀边界的分析处理，进而得到等离子体边界的膨胀速度。利用 ICCD 相机拍摄到的真空腔内靶材结构及尺寸标定方法如图 2 所示。真空腔室内保持干燥空气气压为 1000 Pa 不变，脉冲能量 400 mJ，脉冲半峰全宽为 75 ns 的 CO₂ 激光脉冲垂直入射到平板锡靶表面产生等离子体羽辉在背景空气气体中迅速向外膨胀，532 nm 的二极管抽运固态 (DPSS) 连续激光经扩束准直成半径约为 20 mm 的高斯平行光束通过等离子体区域，被等离子体散射后的 DPSS 激光照射在毛玻璃片上，通过 ICCD 高速拍摄记录毛玻璃片上时间分辨的光强信息，最后通过 WinView 软件对数据信息进行实时处理和显示。ICCD 触发信号由 CO₂ 激光器的脉冲放电干扰提供，为了便于数据处理与叙述，将时间零点移至激光等离子体产生的时刻。通过可编程时序脉冲发生器 (PTG) 控制 ICCD 电子快门的延时和门宽，取出脉冲激光不同发次下不同延迟时刻的时间切片，多次脉冲之后，便可以实现激光等离子体羽辉膨胀过程阴影法的时间分辨测量。下面的实验中，ICCD 曝光时间取为 50 ns，在相同入射激光脉冲条件下，对于同一时间切片进行了 5 次测量，图像具有相同的形状，其辐射强度确定的羽辉边界位置的相对不确定度小于 5%。

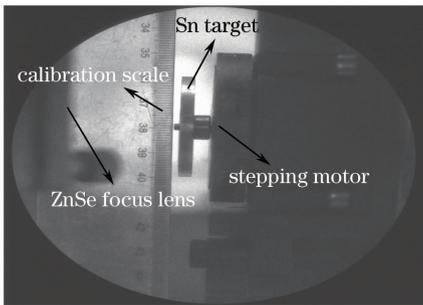


图 2 真空腔内锡靶材结构

Fig. 2 Sn target in vacuum chamber

3 实验结果及分析

脉冲激光烧蚀形成的等离子体羽辉除了在真空中膨胀，一定气压的背景气体对羽辉的膨胀动力学有

重要影响。除了采用数值模拟的方法来模拟特定的靶-背景气体激光等离子体系统，研究者还发展了多种解析模型来描述等离子体羽辉在缓冲气体中的膨胀过程，主要有激波模型^[13]，阻力模型^[14]及扩散模型^[15]等。文献[16]给出了一个基于扩散阻力理论修正的解析近似模型，该模型具有更加广泛的适用性，而且模型参数都具有确切的物理含义，能够根据气体性质、压力、温度及烧蚀粒子的数密度等物理性质准确的确定下来。通过选择合适的过程参数值，该模型能够较好地反映和预测较宽范围实验中激光等离子体羽辉的膨胀规律。该修正的阻力扩散模型可以写为

$$x(t) = v_0 D' \xi^{-1} [1 - \exp(-\xi D'^{-1} t)], \quad (1)$$

式中 x 为羽辉膨胀边界位置坐标， t 为时间， v_0 为初始靶材表面上羽辉波前中烧蚀粒子的最大速度。考虑到经典流体中粒子的粘滞效应， ξ 为扩散系数与时间的乘积。由于激光等离子体克努森层及粒子非麦克斯韦速度分布的影响，背景气体粒子数密度应该用有效值来近似，扩散系数 D' 可以写为

$$D' = K \lambda v_0 = K v_0 (n_g \sigma)^{-1}, \quad (2)$$

式中 K 为与靶材及激光脉冲参数有关的常数， n_g 为缓冲气体分子数密度， σ 为近似的散射碰撞截面， $(n_g \sigma)^{-1}$ 为粒子运动的平均自由程。从该模型及 (2) 式容易得到初始条件为 $x(0) = 0, dx(0)/dt = v_0$ 。减缓系数 $b = \xi D'^{-1}$ 与等离子体极限尺寸 $x_{st} = v_0 D' \xi^{-1}$ 都具有明确的物理含义。

时间分辨的等离子体膨胀边界阴影法测试原始照片图如图 3 所示，它包含了反映等离子体膨胀特征的信息，从中可以测量羽辉边界位置随时间的演化及其边缘形状。通过对照片光强信息的对称化分析和平滑处理，可以得到如图 4 所示的激光锡等离子体羽辉沿靶面法线方向的边界位置随延时的变化曲线，并利用修正阻力扩散模型 (1) 式对实验数据进行了最小二乘法拟合，得到的拟合表达式为

$$x = 15.2 [1 - \exp(-4.7t)], \quad (3)$$

式中 x 为靶面法线方向羽辉的边界位置坐标， t 为延时时间，利用 (3) 式得到的模型曲线如图 4 实线所示。通过对实验数据的处理，图 4 中的插图还给出了等离子体羽辉边界沿靶面法线方向膨胀速度随延时的变化曲线。

激光烧蚀靶材形成的等离子体会向外急剧膨胀，等离子体的喷射速度与入射靶面激光的功率密度有关，如果是在真空中，喷射粒子得不到减速，最后高能粒子将作惯性匀速飞行撞击 EUV 收集镜表面的

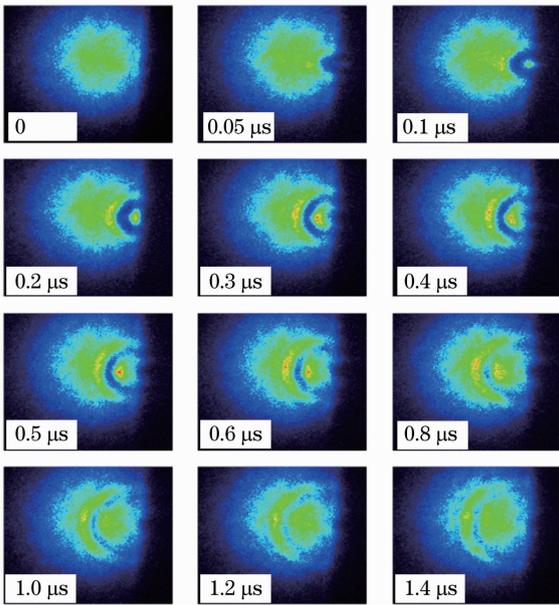


图 3 脉冲 CO₂ 激光 Sn 等离子体羽辉膨胀阴影法时序测量 ICCD 记录影像图

Fig. 3 Time evolution of CO₂ laser produced Sn plasma plume images recorded by ICCD using shadowgraph technique

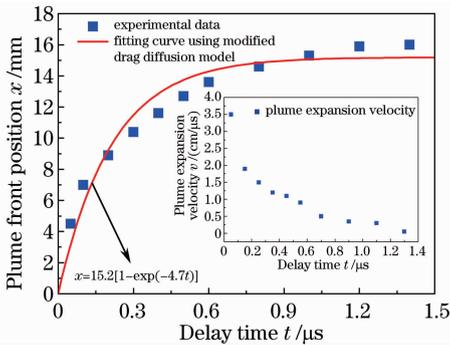


图 4 脉冲 CO₂ 激光 Sn 等离子体羽辉边界随延时的变化及其修正阻力扩散模型拟合曲线

Fig. 4 Time evolution of CO₂ laser produced Sn plasma plume front and fitting curve using modified drag diffusion model

Mo/Si 多层膜而造成损伤。如果在光源和收集镜之间充入缓冲气体,由于等离子体中的离子、原子等碎屑和缓冲气体分子的相互作用将会转移这些碎屑粒子的动能,达到减缓粒子能量甚至屏蔽的效果。从图 4 中可以看出,初期(延时小于 100 ns)等离子体羽辉膨胀的速度可以达到 3 cm/μs,随着延时的增加,由于背景气体分子的碰撞阻力作用,羽辉粒子的速度急剧下降,后期(延时大于 800 ns)羽辉碎屑粒子膨胀速度降到了 0.3 cm/μs,碎屑粒子的动能已降到了 Mo/Si 多层膜的溅射阈值以下。根据模型的拟合结果,等离子体羽辉膨胀的极限尺寸为 $x_{st} =$

15.2 mm。实验结果表明,羽辉碎屑粒子运动的极限距离约为 16 mm。尤其是在羽辉膨胀的早期,理论模型的拟合曲线和实验数据给出的羽辉边界随延时的变化吻合得较好。等离子体中碎屑粒子动能的减小主要是由于缓冲气体原子和碎屑粒子的散射碰撞转移动能而导致的。因此,可以说热碰撞是缓冲气体减缓等离子体羽辉中粒子碎屑的主要机制。

脉冲 CO₂ 激光 Sn 等离子体是下一代半导体光刻中重要的候选极紫外光源,但是限制该光源技术发展的一个主要瓶颈是等离子体碎屑对光学系统尤其是 EUV 收集镜的沉积污染和溅射腐蚀,导致收集镜的反射率急剧下降从而缩短光刻系统的使用寿命。等离子体碎屑不仅包含有高能离子,而且有高速的中性原子和尺寸较大的液滴、团簇或溶胶颗粒等。对于带有电荷的高能离子可以通过施加反向电场或磁场的方法来减速和消除,但是对中性的原子和颗粒却无能为力。实验表明,施加缓冲气体对所有的碎屑都具有抑制作用,通过选择气体种类及控制气压能够达到理想的效果,在 EUV 收集镜的保护方面显示出很大的优越性。值得指出的是加入缓冲气体会对 EUV 辐射产生吸收,对 13.5 nm 波段的 EUV 辐射吸收较小的缓冲气体有氦气、氢气和氩气等。充入的缓冲气压越大,对碎屑粒子的抑制效果越好,但是同时对 EUV 的吸收也越严重,应该合理选择气体种类和气压使高能粒子能够减速到 EUV 收集镜 Mo/Si 多层膜的溅射阈值 150 eV 以下,同时使 13.5 nm 的 EUV 辐射的透射率尽可能地高。

4 结 论

利用 10.6 μm 的 CO₂ 激光脉冲烧蚀平板 Sn 靶产生等离子体,当入射到靶面的激光脉冲能量为 400 mJ,脉冲半峰全宽为 75 ns,充入缓冲气体气压为 1000 Pa 时,基于阴影法高速成像诊断技术测量了等离子体羽辉边界及膨胀速度随延时的变化规律。利用修正的阻力扩散模型拟合了实验数据,模型的预测与实验结果吻合较好。讨论了缓冲气体对等离子体碎屑的减速机理。这一结果对理解和优化极紫外光刻激光锡等离子体光源的碎屑性能是有帮助的,为等离子体羽辉膨胀特性的量化研究提供了一种有效的实验测试手段。

参 考 文 献

1 J. Finders, M. Dusa, P. Nikolsky *et al.*. Litho and patterning

- challenges for memory and logic applications at the 22 nm node [C]. *SPIE*, 2010, **7640**: 76400C
- 2 V. Banine, R. Moors. Plasma source or EUV lithography exposure tools[J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2004, **37**(23): 3207~3210
- 3 Wu Tao, Wang Xinbing, Tang Jian *et al.*. Extreme ultraviolet and visible emission spectroscopic characterization of CO₂ laser produced tin plasma for lithography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(4): 0430002
吴 涛, 王新兵, 唐 建等. CO₂ 激光锡等离子体极紫外及可见光光谱[J]. *光学学报*, 2012, **32**(4): 0430002
- 4 V. Bakshi. EUV Sources for Lithography[M]. Washington: SPIE Press, 2006. 3~41
- 5 Y. Tao, M. S. Tillack, S. Yuspeh *et al.*. Interaction of a CO₂ laser pulse with tin-based plasma for an extreme ultraviolet lithography source[J]. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2010, **38**(4): 714~718
- 6 S. S. Harilal, T. Sizyuk, A. Hassanein *et al.*. The effect of excitation wavelength on dynamics of laser-produced tin plasma [J]. *J. Appl. Phys.*, 2011, **109**(6): 063306
- 7 S. Yuspeh, Y. Tao, R. A. Burdt *et al.*. Dynamics of laser-produced Sn microplasma for a high-brightness extreme ultraviolet light source[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2011, **98**(20): 201501
- 8 J. R. Freeman, S. S. Harilal, A. Hassanein. Enhancements of extreme ultraviolet emission using prepulsed Sn laser-produced plasmas for advanced lithography applications [J]. *J. Appl. Phys.*, 2011, **110**(8): 083303
- 9 Wu Tao, Wang Xinbing, Wang Shaoyi *et al.*. Time and space resolved visible spectroscopic imaging CO₂ laser produced extreme ultraviolet emitting tin plasmas [J]. *J. Appl. Phys.*, 2012, **111**(6): 063304
- 10 Wu Tao, Wang Xinbing, Wang Shaoyi *et al.*. Characteristics of extreme ultraviolet emission from tin plasma using CO₂ laser for lithography [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, **32**(7): 1729~1733
吴 涛, 王新兵, 王少义等. 基于脉冲 CO₂ 激光锡等离子体光刻光源的极紫外辐射光谱特性研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, **32**(7): 1729~1733
- 11 Y. Ueno, G. Soumagne, A. Sumitani *et al.*. Reduction of debris of a CO₂ laser-produced Sn plasma extreme ultraviolet source using a magnetic field[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **92**(21): 211503
- 12 D. Bleiner, T. Lippert. Stopping power of a buffer gas for laser plasma debris mitigation[J]. *J. Appl. Phys.*, 2009, **106**(12): 123301
- 13 S. S. Harilal, C. V. Bindhu, M. S. Tillack *et al.*. Internal structure and expansion dynamics of laser ablation plumes into ambient gases[J]. *J. Appl. Phys.*, 2003, **93**(5): 2380~2388
- 14 D. B. Geohegan. Physics and diagnostics of laser ablation plume propagation for high-Tc superconductor film growth[J]. *Thin Solid Films*, 1992, **220**(1-2): 138~145
- 15 A. V. Rode, E. G. Gamaly, B. Luther-Davies. Formation of cluster-assembled carbon nano-foam by high repetition-rate laser ablation[J]. *Appl. Phys. A*, 2000, **70**(2): 135~144
- 16 A. Bailini, P. M. Ossi. Modelling the propagation of an ablation plume in a gas[J]. *Radiation Effects & Defects in Solids*, 2008, **163**(4-6): 497~503

栏目编辑:宋梅梅