

低碎片激光等离子体软 X 射线源的 实验研究*

林景全 陈 波 曹健林 尼启良 巩 岩 潘守甫[†]

(中国科学院长春光机所应用光学国家重点实验室 长春 130022; [†] 吉林大学原子分子研究所 长春 130022)

提要 报道了一种以固态 CO₂ 为靶的低碎片激光等离子体软 X 射线源的初步研究结果, 描述了光源的结构及自制的透射光栅谱仪, 测量了该软 X 射线源的光谱辐射特性, 并对它的污染情况进行了研究。

关键词 低碎片, CO₂ 靶, 激光等离子体

激光等离子体对于软 X 射线光刻术研究来说是一种很有吸引力的小型化台式光源, 它体积小、峰值亮度高、空间稳定性好。目前所见报道的激光等离子体软 X 射线源多以金属材料做靶, 这种靶材的光源在辐射有用的软 X 射线同时也会产生大量的高温、高速固体碎片^[1]。在软 X 射线投影光刻的应用中, 这些碎片会沉积到等离子体点源附近的多层膜聚光镜的表面上, 大幅度降低其工作性能^[2]。一般认为, 若能消除激光打靶时产生的等离子体碎片对光学系统的污染, 则激光等离子体有可能成为未来软 X 射线投影光刻机的理想光源。为此, 国外已采用了多种措施来尽量减小等离子体碎片所带来的副效应, 有的是利用质量限制的薄片靶, 有的是利用在软 X 射线传播方向上加阻截碎片的高速旋转机械斩片, 还有的是在真空靶室内充入惰性气体来减小碎片速度^[3,4]。

本文描述的低碎片激光等离子体软 X 射线源与常规的金属靶激光等离子体光源的最大区别在于采用了固态 CO₂ 靶。这种靶材的特点是在强激光作用下产生的碎片迅速气化, 不会有固体碎片危害光学元件。这不仅可以大大地延长光学元件的使用寿命, 而且还可通过缩小等离子体点源与光学元件的距离来更有效地利用它所辐射出的软 X 射线。与低碎片气体喷射靶相比, 这种由气体冷冻而成的固体靶能够提供足够的发光离子来获得所需的 X 光转换效率。本文介绍了这种低碎片激光等离子体软 X 射线源的初步实验结果。

1 实验装置

1.1 光源

固态 CO₂ 靶的形成利用了低温气体沉积技术, 首先在真空靶室内造成局部低温的气体沉

* 国家自然科学基金(批准号: 69637040)资助项目。

收稿日期: 1998-02-23; 收到修改稿日期: 1998-05-04

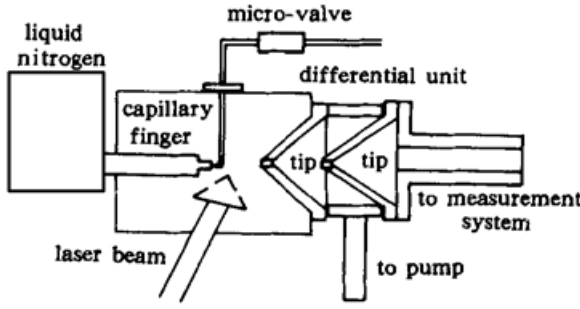


图 1 激光等离子体源示意图

Fig. 1 Diagram of the laser plasma source

积面, 然后通入被冷冻气体, 当气体沉积面的温度低于被冻气体凝为固态的临界温度时, 气体就会沉积在低温面上变成固态。气体冷冻靶光源结构如图 1 所示。

在真空靶室内伸入导热良好的冷头, 冷头上配有低温气体沉积面, 冷头与位于真空靶室外装有液氮的冷源相连。进入真空靶室的 CO₂ 气体的量由高真空针阀控制并由毛细导管通入低温面附近, 在低温沉积面上可形成微小的固态 CO₂ 靶。通过实验探索通入气体速率与靶室内真空度的关系, 可实现气

体的连续供给。为了加快 CO₂ 靶的生长速度, 靶室内应有足够的 CO₂ 气体分子, 而软 X 射线的传播需一定的真空度。为此, 在靶室和光学系统的真空室之间加差分室来解决真空过渡。光学系统所在真空室可维持在 10⁻³ Pa 量级, 靶室内气压为 10⁻¹ Pa 量级。

1.2 光栅谱仪

该低碎片激光等离子体软 X 射线源的光谱辐射特性测量是用自制的透射光栅谱仪进行的, 其原理如图 2 所示。

以 1000 lines/mm 的自支撑的透射光栅 G 为色散元件, 宽度为 100 μm 的狭缝 A 平行光栅刻线、紧贴放置在光栅前方。等离子体点源 S 的尺寸约为 100 μm, 离光栅的距离 L 为 500 mm, 以软 X 光胶片 F 作为接受元件, 其离光栅距离 D 为 450 mm。

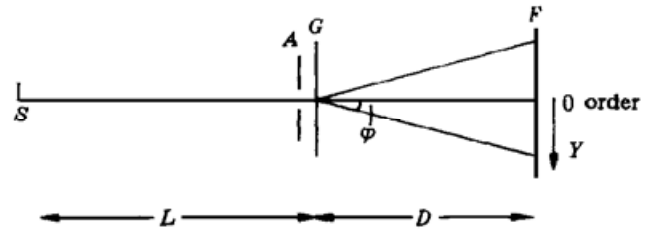


图 2 透射光栅谱仪原理图

Fig. 2 Schematic diagram of the transmission grating spectrometer

光栅的色散由光栅方程 $d\sin\varphi = m\lambda$ (正入射) 所决定, d 为光栅周期, m 为衍射级次, λ 为波长。由此方程可获得色散关系: 在小角度近似下, $\sin\varphi = y/D$, y 为从零级中心到所考虑点的距离, 结合光栅方程, 得到一级 ($m = 1$) 的线色散为 $dy/d\lambda = D/d$ 。

光栅的光谱分辨率 $\Delta\lambda$ 受光源尺寸、光栅孔径、衍射极限等几方面限制。衍射极限 $\Delta\lambda_d$ 等于光栅中的栅线数量, $\Delta\lambda_d = \lambda/M$ (M 为光栅的细丝线条数)。当考虑光源尺寸及光栅孔径对光谱分辨率的影响时, $\Delta\lambda$ 由下式决定^[5]

$$\Delta\lambda = d(S + A)/L + dA/D \tag{1}$$

结合具体实验参量, 可得该谱仪的线色散为 0.45 mm/nm, 光谱分辨率为 0.6 nm (忽略衍射极限的影响)。

2 实验结果及讨论

实验是用点聚焦激光打靶, 激光波长为 1.06 μm, 脉宽为 8 ns, 单次脉冲能量为 1 J, 焦斑直径约为 100 μm, 靶面功率密度为 1.6 × 10¹² W/cm²。为了满足底片的曝光要求, 进行累积打靶, 共打靶 20 次。曝光后的 X 光胶片用 D76 显影液处理, 显影温度为 18℃, 时间为 15 min, 用水漂洗后, 进行定影处理, 时间为 5 min。图 3 为使用前面描述的摄谱仪获得的光谱照片。

从照片中可清楚地看出在 11.6 nm, 13.0 nm, 15.0 nm 等波长附近有较强的辐射, 经过辨认它们分别来自于 $OV^{-}2s-4p$ (11.6 nm), $OV^{-}2p-4d$ (13.0 nm), $OV^{-}3d-2p$ (12.9 nm), $OV^{-}2s-3p$ (15.0 nm) 等强跃迁, 这与用 MCDF 软件^[6]的计算结果一致。这些波长恰好与软 X 射线投影光刻系统中所用的、具有光谱选择特性的多层膜元件反射峰值相匹配^[7]。从照片上可看出 -1 级光谱色散效果较差, 在沿与色散垂直方向上 -1 级谱的能量分为上下两部分, 从底片上还可辨认出其中每一部分谱线都与 +1 级谱线相对零级呈对称图样分布, 该实验结果具有重复性。这可能是由于光栅位置调整不佳或其本身有某些缺欠所致。

我们还对 CO_2 靶的污染情况进行了监测。方法是在靶室内放置预先清理干净的玻璃载物片来接受等离子体碎片, 载物片距等离子体点源 100 mm, 在打靶 10^3 次后取出, 用日本产 Olympus 型光学显微镜对载物片进行观察, 放大倍数为 100, CO_2 靶的结果如图 4 (a) 所示, 未观察到有碎片沉积。

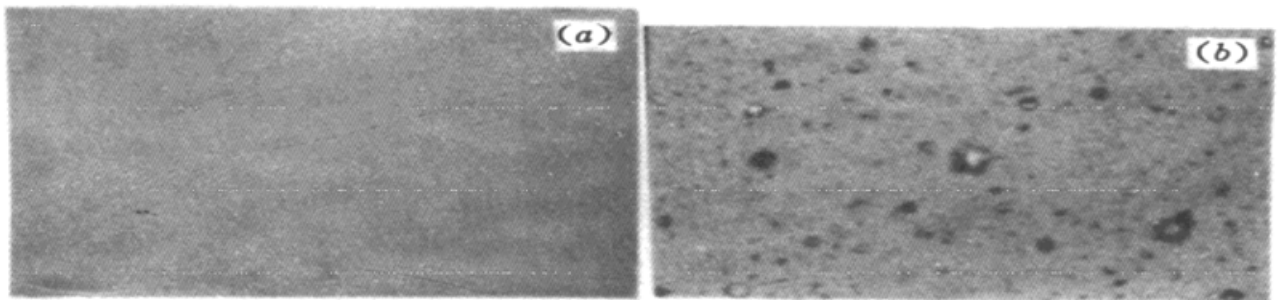


图 4 (a) CO_2 靶的测量结果; (b) Cu 靶的测量结果

Fig. 4 (a) Measured result of a CO_2 target; (b) Measured result of a Cu target

为了说明问题, 用同样的实验条件对金属 Cu 靶进行碎片监测, 结果如图 4 (b) 所示, 可明显地观察到在载物片表面较稠密地附着大小不均的碎片, 在显微镜下观察, 碎片的直径多数在 $1\sim 5\ \mu\text{m}$ 之间, 还有一些直径大约在 $10\sim 20\ \mu\text{m}$ 之间, 最大的直径可达 $50\ \mu\text{m}$ 。这些由中性原子团构成的块状金属碎片主要是等离子体形成时在临界密度处所产生的强冲击波与金属靶材表面相互作用的结果^[4]。由此对比实验可充分地说明固态 CO_2 靶激光等离子体光源在减少碎片产生方面较金属靶光源有本质性的改善。

由低碎片激光等离子体软 X 射线源的初步实验结果可以得出如下结论:

(1) 这种固态 CO_2 靶在强激光作用下生成的产物可迅速气化, 不会有金属靶那样的碎片产生, 因而放置在其附近的软 X 射线光学元件是安全的, 与金属靶光源相比, 这种低碎片等离子体光源较适合与光学系统相连接;

(2) 这种新型光源的靶材是从靶室外连续地供给的, 避免常规金属靶光源频繁更换靶体给实验带来的诸多不便, 它可实现光源的连续长期运转;

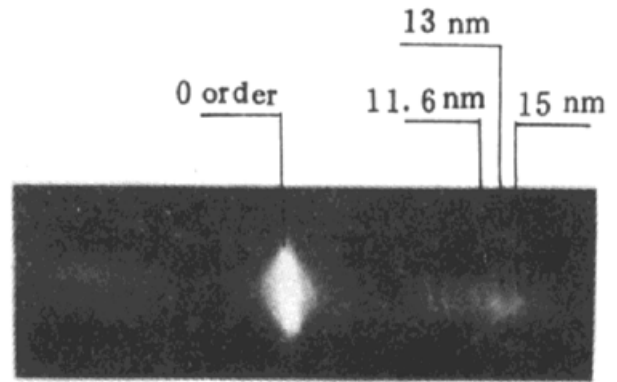


图 3 低碎片等离子体源软 X 射线光谱辐射图

Fig. 3 Spectral emission of the low-debris soft-X-ray source

(3) 这种光源的强线辐射正好落在软 X 射线投影光刻感兴趣的波段范围内(11~ 17 nm)。

因此,以这种靶为基础的激光等离子体软 X 射线源在投影光刻应用方面展现出广阔的前景,但要达到实用化的要求,还需大量的实验工作。

参 考 文 献

- 1 H. A. Bender, D. O'Connell, W. T. Silfvast. Velocity characterization of particulate debris from laser-produced plasmas used for extreme-ultraviolet lithography. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(28): 6513~ 6521
- 2 F. Jin, M. Richardson. Conversion efficiency and debris studies of ice targets for EUV projection lithography. *OSA Proceedings on Extreme Ultraviolet Lithography*, 1994, **23**: 260~ 264
- 3 A. G. Michett. Scanning X-ray microscopy using a laser-produced source. *Rev. Sci. Instrum.*, 1993, **64**(6): 1478~ 1481
- 4 A. G. Michette, G. Morrison, C. Buckley (eds). X-ray Microscopy. Springer Series in Optical Sciences. Vol. 67, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1992. 54~ 57
- 5 N. M. Ceglio, R. L. Kauffman, A. M. Hawryluk *et al.*. Time-resolved X-ray transmission grating spectrometer for studying laser-produced plasmas. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(2): 318~ 327
- 6 I. P. Grant, B. J. Mckenzie, P. H. Norrington *et al.*. Multi-configurational Dirac-Fock package. *Comput. Phys. Commun.*, 1980, **21**(2): 207~ 228
- 7 A. M. Hawryluk, N. M. Ceglio. Wavelength considerations in soft-X-ray projection lithography. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(34): 7062~ 7066

Experimental Study of a Low-debris Laser-produced Plasma Soft-X-ray Source

Lin Jingquan Chen Bo Cao Jianlin Ni Qiliang Gong Yan Pan Shoufu*
 Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022
 * Jilin University, Changchun 130022

Abstract A low-debris CO₂ target soft-X-ray source and a home-made transmission grating spectrometer are described in this paper, the preliminary experimental results of spectral emission and debris measurement of the source are given.

Key words low-debris, CO₂ target, laser-produced plasma