

激光等离子体软 X 射线源靶材的选择及特性*

林景全¹ 陈 波¹ 尼启良¹ 曹健林¹ 周忠源²

(1 中科院长春光机所应用光学国家重点实验室, 长春 130022)

(2 吉林大学原子分子所, 长春 130022)

摘 要 给出了用于软 X 射线投影光刻的激光等离子体源靶材的选择依据。计算了类锂离子辐射跃迁波长和相应的跃迁速率值。并通过与常规金属靶的比较, 给出了实验靶的一些特性。

关键词 激光等离子体 靶材 碎片

中图分类号 TN 248.22

目前, 最有希望满足未来超大规模集成电路工业化生产的光刻方法是以小型激光等离子体为光源的软 X 射线投影光刻, 其中激光等离子体软 X 射线源的选取是较关键的技术之一, 而选定靶材料是重要的一步, 这是因为靶材决定着光源的光谱辐射情况以及其他许多性质。

在以激光等离子体为光源的软 X 射线投影光刻机中, 聚光镜及成像系统通常都是由价格昂贵、反射带宽狭窄且对使用环境要求苛刻的软 X 射线多层膜组成, 由于多层膜反射镜数量多(一般达七块以上^[1]), 因而其反射率是决定达到硅片表面上软 X 射线通量的主要因素之一。目前, Mo/Si 多层膜在 13nm 处反射率最高^[2], 这就决定了 13nm 是当前技术条件下软 X 射线投影光刻的最佳工作波长。此外, 在强激光作用下形成的等离子体是否洁净也至关重要。Sn、Au 等金属靶激光等离子体源在 13nm 处虽有较强的辐射, 但在强激光作用下形成等离子体的同时, 也会伴随着大量的高温、高速金属碎片飞溅, 它们坚固地粘附在等离子体源附近的多层膜聚光镜上, 大幅度降低了其反射率^[3], 同时也会污染系统中的其它光学元件, 甚至造成元件的机械损伤。但用惰性气体或一些常温下为气态或易挥发性液态的低 Z 元素化合物做靶, 可消除固体碎片的产生, 有希望满足软 X 射线投影光刻要求, 国外已就此进行了大量的研究, 取得了一些有意义的成果, 在国内我们首先开展了此方面的研究工作。

1 靶材的选择及相应的计算

为了满足软 X 射线投影光刻的要求, 激光等离子体光源的靶材应首先选择在多层膜反射峰处有较强辐射的材料, 且由它形成的等离子体源必须洁净。按此原则, 对可组成常温下呈气态或易挥发性液态物质的一些低 Z 元素的光谱性质进行了理论计算, 本计算需运行 MCDFF 程序包(同时考虑横向 Breit 修正和量子电动力学修正)以及计算相对论跃迁几率的后续程序^[4]。对在软 X 射线波段可产生线辐射的 C、N、O、F 等低 Z 元素的高阶离子进行大量的计算后发现: O⁵⁺、F⁶⁺ 等离子在 13nm 处具有产生强电偶极辐射跃迁的条件。由于 F 元素实验操作起来困难并且对环境有害, 暂不考虑。在此仅列出 O⁵⁺ 的主量子数 $n = 5$ 到 $n = 2$ 各能级间较强的电偶极辐射跃迁波长和自发辐射几率值, 表中 Coulomb 列是在 Coulomb 规范

* 应用光学国家重点实验室基金资助项目
1998年3月10日收到原稿, 1998年5月11日收到修改稿。
林景全, 男, 1966年7月出生, 在读博士生

下的计算值, Length 列是在Length 规范下的计算值^[4]。它们的相对偏差非常灵敏地反映了所得波数的准确性, 最大允许值为10%。本文所计算的绝大部分跃迁, 偏差均在3% 以内。

表1 O⁵⁺ 离子辐射波长 λ 和跃迁几率 P_{tr}

Table 1 Radiation wavelength λ and transition probabilities P_{tr} of O⁵⁺

No.	Transition	λ/nm	$P_{tr}/10^{10}\text{s}^{-1}$	
			Coulomb	Length
1	2S-3P _{1/2}	15.026	2.518	2.567
2	2S-3P _{3/2}	15.022	2.510	2.507
3	2S-4P _{1/2}	11.595	1.108	1.211
4	2S-4P _{3/2}	11.594	1.177	1.208
5	2S-5P _{1/2}	10.493	0.621	0.637
6	2S-5P _{3/2}	10.492	0.619	0.636
7	2P _{1/2} -3S	18.447	0.581	0.562
8	2P _{3/2} -3S	18.465	1.166	1.128
9	2P _{1/2} -4S	13.252	0.223	0.214
10	2P _{3/2} -4S	13.220	0.447	0.429
11	2P _{1/2} -5S	11.757	0.108	0.104
12	2P _{3/2} -5S	11.764	0.218	0.208
13	2P _{1/2} -3D _{3/2}	17.346	7.289	7.304
14	2P _{3/2} -3D _{3/2}	17.362	1.456	1.460
15	2P _{3/2} -3D _{5/2}	17.361	8.739	8.760
16	2P _{1/2} -4D _{3/2}	13.010	2.421	2.423
17	2P _{3/2} -4D _{3/2}	13.019	0.488	0.485
18	2P _{3/2} -4D _{5/2}	13.018	2.901	2.912
19	2P _{1/2} -5D _{3/2}	11.660	1.123	1.128
20	2P _{3/2} -5D _{3/2}	11.667	0.224	0.225
21	2P _{3/2} -5D _{5/2}	11.668	1.345	1.351

由表1可知, 类锂氧离子在17.3nm (2p-3d)、13nm (2p-4d) 等处跃迁几率比较大, 虽然类锂氧离子在17.3nm 处谱线的计算强度化13nm 处约高3倍, 但软X 射线多层膜反射镜在13nm 及17.3nm 处的最高反射率分别为67% 和42%^[2,5], 而投影光刻系统需要的多层膜反射镜数量达七块以上。因而, 仅考虑所用多层膜反射镜数量及其反射率两个因素, 当工作波长为13nm 时, 最终能到达硅片上的软X 射线通量比17.3nm 时要高近10倍。另外, 工作波长短有利于提高光刻图形的分辨率。

由氧与其它元素构成的气态或易挥发性液态化合物中, H₂O 及 CO₂符合光刻用激光等离子体靶的要求且较易获得, 据现有实验条件我们选择了低温冷冻的CO₂作为靶材。用激光打固态CO₂靶产生等离子体, 光谱诊断表明它的主要辐射线谱在软X 射线波段, 优化打靶条件可在13nm 处产生较强的辐射^[6]。

2 靶材特性讨论

固态CO₂靶主要有三个特性:

第一, 低碎片性。在强激光与固体靶相互作用时, 激光能量通过热传导传给靶材, 使之急剧升温、部分汽化; 同时, 在等离子体内部形成的热压和在冲击波作用下部分靶材分裂成大小不一的碎块而高速地飞离靶面。CO₂靶的情况与金属靶完全不同, 其产物在真空中迅速汽化, 被及时抽出真空系统, 不会有碎片滞留在光学元件表面上, 具体监测方法是在靶室内放

置预先清洗干净的玻璃载物片来接收等离子体碎片, 载物片距等离子体源100mm, 打靶 10^3 次后取出, 监测结果照片见图1。

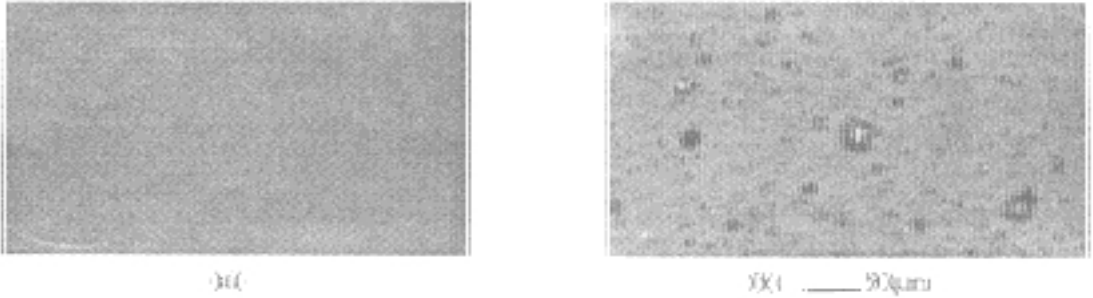


Fig 1 Photograph of debris adhered to glass from CO₂ target (a) and Cu target (b)

图1 附着在玻璃上的来自CO₂靶与Cu靶碎片的监测照片

图1a中未观察到有碎片沉积到载物片上; b中可明显地看到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1~5 μ m之间, 还有一些直径大约为10~20 μ m, 最大的直径可达50 μ m。由此可充分说明固态CO₂靶在减少碎片产生方面较金属靶有显著改善。

第二, 所形成的等离子体主要辐射分立的线谱, 这在投影光刻中有利于减轻对多层膜元件有害的离带热。中、高Z金属元素由于核外电子较多, 在强激光作用下可产生多电离价的离子, 在软X射线波段辐射连续谱。而低Z元素, 例如氧、碳等, 可产生的电离价较少, 在软X射线波段主要辐射分立的线谱。因此, 一般来说, 由低Z元素构成的CO₂靶比高Z金属靶在整个软X射线波段的能量转换效率低(约为金属靶的10%), 这对实际应用有益。软X射线投影光刻中所用多层膜反射镜的工作特性之一为光谱选择性(仅在反射中心波长的0.5nm内有高反射率, 此范围之外, 反射率急剧下降)。中、高Z靶在软X射线波段所辐射的连续谱绝大部分都落在多层膜的工作带宽之外(称这部分能量为离带热), 被多层膜聚光镜的膜层材料所吸收。软X射线投影光刻系统需光源高重复频率工作, 产生的离带热功率很大, 可能导致多层膜膜层间隔的改变、镜子衬底表面的热形变甚至物理损伤, 反射率严重降低^[1]。而CO₂靶则可大大减少辐射有害的离带热, 非常有利于延长多层膜反射镜的使用寿命。

虽然CO₂靶比高Z金属靶在软X射线波段的总体转换效率低许多, 但实验表明在一定的打靶条件下, 其工作离子(类锂离子)在其强辐射跃迁13nm处(带宽0.3nm)可获得大于1%的转换效率^[7], 且该波长又恰好与多层膜的反射峰值相匹配, 这使得CO₂靶既能减少辐射有害的离带热又能提供足够强度的X光。

第三, 可实现靶材的连续供给而不破坏靶室的真空状态, 因而光源可实现长期连续运转。为了保持发光的稳定性, 金属靶在打靶一定次数后, 就不得不停机来更换新的靶。假定直径20mm、长度40mm的圆柱形金属靶体绕轴心每转3.5时激光打靶一次, 那么这个靶体只能使用8000次。而我们所用的CO₂靶是通过传递装置从靶室外部连续地供给^[6], 免除了因更换靶而停机带来的时间耽搁和诸多不便。

目前, 仅从软X射线投影光刻系统对激光等离子体光源的要求来看, CO₂靶是符合条件的, 但要想满足光刻生产对光源的要求, 还需做大量的研究工作。

参考文献

- 1 Hawryluk A M, et al Wavelength consideration in soft-X-ray lithography. *Appl Opt*, 1993, **32**: 7062~ 7069
- 2 Stearns D G, et al Multilayer mirror technology for soft X ray projection lithography. *Appl Opt*, 1993, **32**: 6952~ 6955
- 3 Jin F et al Characterization of a laser plasma water droplet EUV source. *SPIE*, 1995, **2523**: 81~ 87
- 4 朱颀人, 潘守甫. MCDF 程序包和电偶极辐射跃迁几率的相对论计算程序. *计算物理*, 1990, **7**: 403~ 406
- 5 Maxwell J A, Willis T D, et al Performance of the multilayer coated mirrors for multi spectral solar telescope array. *SPIE*, 1993, **2011**: 381~ 390
- 6 Chen Bo, Lin Jingquan, et al Low debris laser plasma source. *SPIE*, 1997, **3175**: 302~ 305
- 7 Richardson M. Performance criteria of mass-limited ice laser plasma target for EUV lithography. OSA Proceedings on EUV Lithography. 1994. **23**: 265~ 269

TARGET MATERIAL CHOICE AND ITS CHARACTERISTIC OF LASER-PRODUCED PLASMA SOURCE

Lin Jingquan, Chen Bo, Ni Qilang, and Cao Jianlin

*State Key Lab of Applied Optics, Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun, 130022*

Zhou Zhongyuan

Institute of Atom and Molecule, Jilin University, Changchun 130022

ABSTRACT Choice criteria on target material for soft X-ray projection lithography source were proposed in this paper. Spectral data of L_i-like oxygen ion were given based on this criteria. The characteristics of new plasma target were given compared with conventional metal targets.

KEY WORDS laser plasma, target material, debris