

# 激光等离子体软 X 线光源的研究

李 K

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130022)

**摘要** 本文设计了一种高精度旋转靶系统的激光等离子体软 X 线光源, 亮度高, 强度大, 光斑尺寸(100~200) $\mu\text{m}$ , 脉冲时间几十纳秒, 可以辐射出直至软 X 线的连续光谱及迭加在连续光谱之上的线光谱, 峰值波长位于(13~17)nm。在多次测量取平均的方式下, 其稳定性和重复性优于 $\pm 4.5\%$ 。

**关键词:** 激光等离子体; 光谱辐射; 软 X 射线; 真空紫外

## 1 前言

软 X 线—真空紫外光学的开拓利用是国际上极其活跃的前沿科学领域。为满足超大规模集成电路的亚微米光刻和软 X 线显微镜研究, 迫切需要高性能的软 X 线—真空紫外光源。其中, 激光等离子体光源是一种利用高能激光束聚焦打靶产生高温、高密度等离子体的软 X 线—真空紫外辐射的脉冲式光源, 恰好适合这方面的研究。

## 2 激光等离子体及其辐射

当一强激光束聚焦于金属靶面上; 功率密度超过  $10^{10}/\text{cm}^2$  时, 靶原子迅速吸收光能, 电子脱离原子核的束缚成为自由电子, 在靶面形成高温( $\approx 1\text{Kev}$ )低密度( $\approx 0.1\text{g}/\text{cm}^3$ )的转化层等离子体区、低温( $\approx 100\text{ev}$ )高密度( $\approx 1\text{g}/\text{cm}^3$ )的二次辐射等离子体区和高密度( $\approx 10\text{g}/\text{cm}^3$ )的阶跃波区。图 1 给出了激光打靶形成等离子体的物理图象<sup>[1]</sup>。

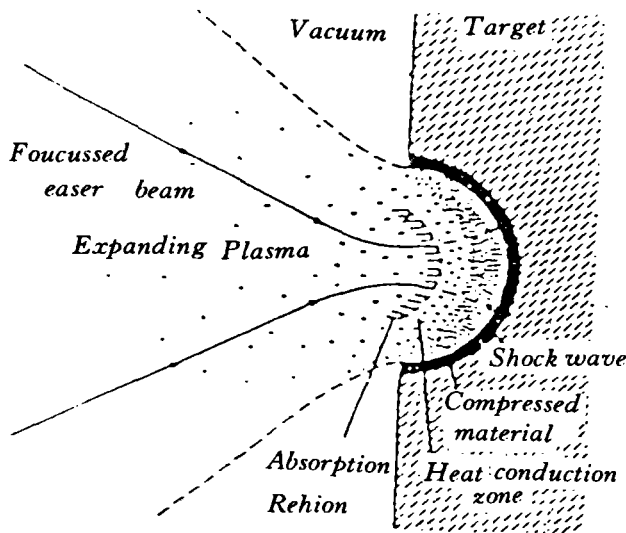


图 1 形成激光等离子体的物理图像

激光等离子体的辐射包括韧致辐射、复合辐射和激发辐射,可辐射出软 X 线—真空紫外波段的连续光谱及迭加在连续光谱之上的线光谱,其辐射功率密度为:<sup>[2][3]</sup>

$$P \approx 1.6 \times 10^{-32} n^{Z^2} + n_e Z^2 T_e^{1/2} [1 + E_I/T_e + 4.3 \times 10^7 \exp(-E_I/2T_e)/Z^2 T_e]$$

式中,  $Z$  为电离价数,  $n^{Z^2}$  为  $Z$  价离子密度,  $E_I$  为激发能,  $n_e$ 、 $T_e$  分别为电子的密度和温度。

### 3 实验装置及靶室系统设计

激光等离子体源及光谱辐射特性测试装置主要由脉冲激光器及聚焦系统、靶室系统、单色仪光电探测系统和真空系统等部分组成,实验装置框图如 2 所示。

激光器选用波长为  $1.06\mu\text{m}$ 、脉冲时间  $8\text{ns}$ 、单次脉冲能量  $100\text{mJ}$ (本振)和  $800\text{mJ}$ (放大)、光束发散角  $0.58\text{mrad}$  的调 Q Nd:YAC 激光器。聚焦镜选用焦距为  $90\text{mm}$  消球差的非球面镜和焦距为  $240\text{mm}$  的普通球面镜,聚焦光斑大小分别为  $85\mu\text{m}$  和  $200\mu\text{m}$ 。在考虑实际情况下,靶面照度在  $7 \times 10^{10}\text{W}/\text{cm}^2$  到  $2 \times 10^{11}\text{W}/\text{cm}^2$  之间。

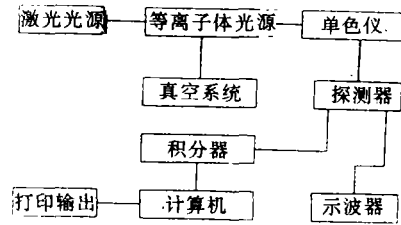
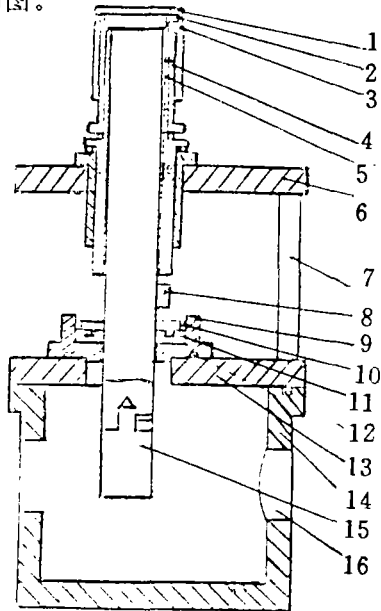


图 2 实验装置框图

激光聚焦打靶会使材料表面损伤产生凹陷,它直接影响到激光等离子体光源的光谱辐射特性和稳定性。因此,激光打靶到一定次数后,应更换新的靶面,而且新靶面原则上应是旧靶面的再现。为此,设计了一种高精度偏心旋转靶室系统,由一台步进电机控制,完成圆柱靶的旋转和提升,旋转精度好于  $40\mu\text{m}$  图(3)给出了靶室系统结构图。



- |         |           |
|---------|-----------|
| 1、旋转靶轴  | 2、钢珠      |
| 3、调节螺母  | 4、啮轮螺旋筒   |
| 5、轴筒    | 6、支撑板法兰   |
| 7、支撑杆   | 8、定向轴承    |
| 9、密封法兰  | 10、压圈     |
| 11、轴密封圈 | 12、密封 O 圈 |
| 13、靶室   | 14、上盖板法兰  |
| 15、靶    | 16、窗口     |

图 3 旋转靶室系统结构图。

单色仪采用 Seya-Namioka 1m 正入射凹面光栅单色仪和 Mcpherson247 掠入射凹面光栅单色仪,可分别完成紫外—真空紫外和软 X 线—真空紫外光谱测试,光电倍增管输出信号通过两种方式采集:一是利用示波器直接读取,二是将光电倍增管输出信号放大积分经 AD 变换输入计算机中进行存贮、显示和打印。

#### 4 激光等离子体光源的光谱辐射特性和实验结果分析

(1)激光等离子体光源的紫外—真空紫外相对光谱分布:调 Q Nd:YAG 激光器设置在放大级输出,测量了铜和铁等离子体的紫外—真空紫外相对光谱分布,如图 4 和图 5 所示。

从图 4 和 5 可以看出,光源在(50~180nm)区间线谱较丰富且辐射强,在高于 180 nm 谱区,对于铜靶近似为准连续光谱且辐射极弱,而对于铁靶则具有很强的分立线谱且辐射较强。

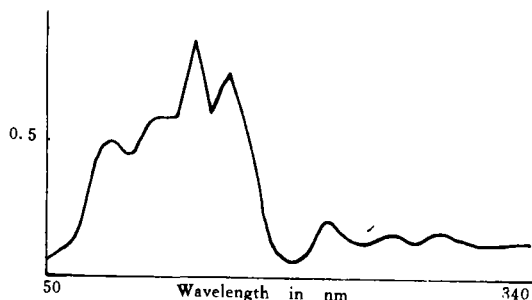


图 4  $f=90\text{mm}$  时铜等离子体的相对光谱

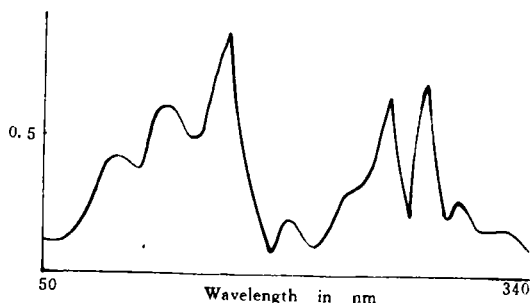


图 5  $f=90\text{mm}$  时铁等离子体的相对光谱

(2)激光等离子体光源的软 X 线—真空紫外相对光谱分布及实验结果分析:调 Q Nd:YAG 激光器由放大级输出,在靶面照度  $I=1.25 \times 10^{11} \text{W/cm}^2$  情况下,测得铜等离子体的软 X 线—真空紫外相对光谱分布如图 6 所示。

从图 6 可以看出,激光等离子体光源的软 X 线—真空紫外光谱是连续光谱之上迭加线谱,其峰值波长位于 13nm 附近,在长波方向缓慢衰减,并出现阶段性跳跃,这正是韧致辐射和复合辐射的结果。

为验证测量结果的可信性,利用该激光等离子体光源测量了厚度为 200nm 的铅滤光片的透过率,如图 7 所示。

这与美国 USC 空间科学中心测得的 150nm 厚铅滤光片的透过率曲线是一致的,只是由于我们所用滤光片较厚,且表面氧化。因而测得的透过率值要低于美国 USC 空间科学中心的测量值。

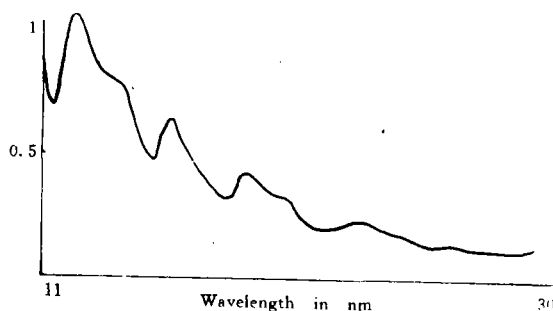


图 6  $I=1.25 \times 10^{11} \text{W/cm}^2$  时铜等离子体的相对光谱

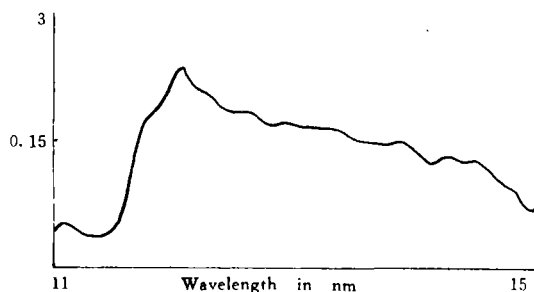


图 7 200nm 厚铅滤光片的透过曲线

(3)靶面照度对激光等离子体光源的软X线—真空紫外光谱特性的影响:在三种不同靶面照度下测量了铜等离子体的软X线—真空紫外相对光谱,如图8、9、10所示。

从图8、9、10可以看出,对应三种不同靶面照度。其峰值波长分别为13nm、14nm、16nm,即激光等离子体光源的软X线—真空紫外峰值波长随靶照度的变化而改变,是可调的。

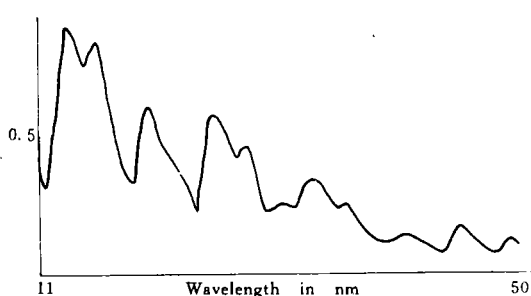


图8  $I=1.25 \times 10^{11} \text{W/cm}^2$  时铜等离子体的相对光谱

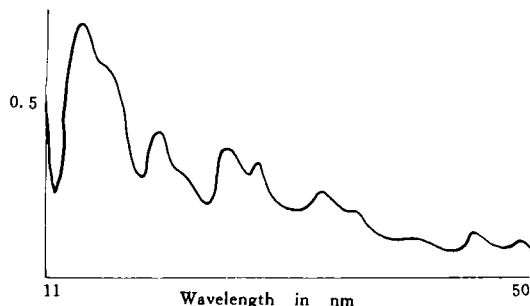


图9  $I=9.78 \times 10^{11} \text{W/cm}^2$  时铜等离子体的相对光谱

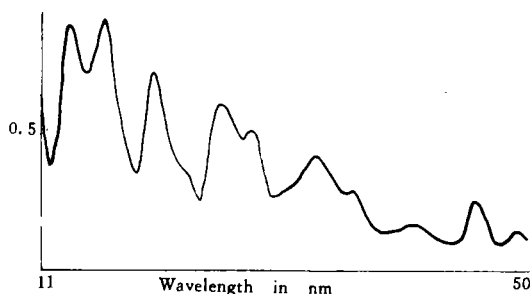


图10  $I=1.75 \times 10^{11} \text{W/cm}^2$  时铜等离子体的相对光谱

(4)激光等离子体光源的稳定性和重复性:在圆柱状铜靶上均分24点,每点连续打靶30次,取30次测量结果的平均值,测量了 $\lambda=18\text{nm}$ 处光谱辐射强度的稳定性和重复性,结果如表1所示。

表1  $\lambda=18\text{nm}$  处脉冲信号测量结果

269	280	269	285	275	266
284	272	217	277	284	283
288	275	279	286	279	275
275	277	268	274	291	268

从表1可知,脉冲信号的平均值是277mV,最大值是291mV,最小值是266mv,其相对变化量即光源的稳定性和重复性为 $\pm 4.5\%$ 。

## 5 结论

本文设计了一种高精度旋转靶系统的激光等离子体光源,探讨了光源的辐射机理,分析了

光源的软 X 线—真空紫外光谱辐射特性、软 X 线的转换效率及等离子体电子温度与靶面功率密度(与激光器的脉冲能量、脉冲时间半宽度,光束发散角和聚焦镜等参量有关)和靶材料(原子序数)的关系,测试了光源的紫外—真空紫外及软 X 线—真空紫外光谱的相对分布,验证了理论分析和实验结果的一致性。

研制的激光等离子体光源具有以下特点:

- (1)光源的激光斑尺寸小( $100\mu\text{m}\sim 200\mu\text{m}$ ),脉冲时间短(几十纳秒)可作为点光源。
- (2)旋转靶转动精度高(好于  $40\mu\text{m}$ ),保证了光源大小、空间位置及光谱辐射的稳定性和重复性。
- (3)光谱范围广,可以辐射出直至软 X 线的连续光谱及迭加在连续光谱之上的线光谱。
- (4)软 X 线—真空紫外辐射峰值波长可调。
- (5)亮度高、强度大,在多次测量取平均的方式下,稳定性和重复性优于  $\pm 4.5\%$ 。
- (6)软 X 线转换效率高,溅射粒子及硬 X 线少。
- (7)体积小,结构紧凑,换靶方便,适合一般的实验室使用。

#### 参 考 文 献

- [1]R. Sigel etc. ,SPIE,1987,831:73
- [2]P. Nicolosi etc. ,Appl. phys. ,1970,B26:117—124
- [3]M. J. Bernstein and G. G. Comsor, J. Appl. Phys. ,1970,41(2):729

### Investigation on Soft X-ray Laser Produced Plasma Source

Li K

(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)

#### Abstract

This thesis designs a Laser—Produced Plasma (LPP) source with high precision rotation target system. The laser system used as excitation source is a Q-Switched Nb:YAG laser emitting energies from 100mJ to 800mJ at a wavelength of  $1.06\mu\text{m}$  with pulse duration of 8ns (FWHM) and pulse repetition rate of 1Hz, 5Hz and 10Hz in combination with two sorts of focusing lenses of 90mm and 240mm focal length. The LPP source developed has short duration of the emission (tens ns), small light spot ( $100\text{--}200\mu\text{m}$ ), high brightness and high intensity. It can produce considerable amount of Soft X-ray-Vacuum Ultraviolet spectra radiation both line emission and continue emission. In the mean time, the radiative peak wavelength can be adjusted from 13nm to 17nm. The stability and reproducibility of the LPP source is better than  $\pm 4.5\%$ .

**Key word:** Laser-Prodiation, Plasma, Spectrum radiation  
Spectrum radiation  
Soft x-ray-vaccum. Ultraviolet