

CO₂ 激光锡等离子体极端紫外及可见光光谱

吴 涛^{1,2} 王新兵¹ 唐 建¹ 王少义¹ 饶志明¹ 杨晨光¹ 卢 宏¹

(¹ 华中科技大学光电子科学与工程学院武汉光电国家实验室, 湖北 武汉 430074)

² 武汉工程大学理学院, 湖北 武汉 430074

摘要 利用 CO₂ 激光烧蚀锡靶产生等离子体, 当入射到靶面的单个脉冲能量为 400 mJ, 半峰全宽 (FWHM) 为 75 ns 时, 使用光谱仪和增强型电荷耦合器件 (ICCD) 采集了等离子体的时间分辨光谱。在局域热平衡假设下, 利用谱线的斯塔克展宽和五条 Sn II 谱线的相对强度计算并得到了等离子体电子密度、电子温度和辐射谱线强度随时间的变化规律; 利用掠入射极端紫外平场光栅光谱仪, 结合 X 射线 CCD 同时探测了光源在 6.5~16.8 nm 波段的时间积分极端紫外辐射光谱。实验结果表明: 激光点燃等离子体早期的 100 ns 内有很强的连续谱, 此后才能分辨出明显的原子和离子线状谱。在延时 0.1~2.0 μs 的时间区间内, 等离子体中的电子温度和密度分别在 2.3~0.5 eV 和 $7.6 \times 10^{17} \sim 1.2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 范围内, 均随时间经历了快速下降, 然后再较缓慢下降的过程。激光锡等离子体极端紫外不可分辨辐射跃迁光谱峰值中心位于 13.5 nm, FWHM 为 1.1 nm。

关键词 光谱学; 激光等离子体; 电子密度; 电子温度; 极端紫外辐射

中图分类号 TN214; O65

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201232.0430002

Extreme Ultraviolet and Visible Emission Spectroscopic Characterization of CO₂ Laser Produced Tin Plasma for Lithography

Wu Tao^{1,2} Wang Xinbing¹ Tang Jian¹ Wang Shaoyi¹ Rao Zhiming¹

Yang Chenguang¹ Lu Hong¹

(¹ Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, School of Optoelectronic Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

² School of Science, Wuhan Institute of Technology, Wuhan, Hubei 430074, China

Abstract The experiments of laser-produced tin plasma are carried out using a CO₂ laser with the energy of 400 mJ of each pulse and the full width at half maximum (FWHM) of 75 ns. The temporal evolution of visible emission spectrum are measured using a spectrograph coupled with an intensified charge-coupled device (ICCD) in vacuum. The plasma electron temperature is inferred by the Boltzmann plot method from five singly ionized Sn emission lines, while electron density measurements are made using Stark broadening method by assuming the conditions of local thermodynamic equilibrium. Extreme ultraviolet (EUV) spectral measurement is made throughout the wavelength region of 6.5~16.8 nm using a grazing incidence flat-field grating spectrometer coupled with an X-ray CCD for the detection of time-integrated spectrum. The results show that optical emission spectrum is mainly the continuous spectrum at the early stage of plasma expansion (within the first 100 ns) and the continuous spectrum weakens gradually while the line spectrum becomes dominating. Electron temperature is measured in the range of 2.3~0.5 eV, and electron density is measured in the range of $7.6 \times 10^{17} \sim 1.2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, as the time delay is varied from 0.1 to 2.0 μs. Both the electron temperature and density decrease fast at early delay time and slowly decrease at later delay time. The extreme ultraviolet emission measurement of laser-produced-tin plasma shows that the peak of the EUV spectrum is located at 13.5 nm and the FWHM of the unresolved transition arrays is 1.1 nm.

Key words spectroscopy; laser-produced plasma; electron density; electron temperature; extreme ultraviolet emission

OCIS codes 300.6365; 300.6560; 140.3440; 140.3070

收稿日期: 2011-09-29; 收到修改稿日期: 2011-10-17

基金项目: 国家自然科学基金(61078024)资助课题。

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

导师简介: 王新兵(1967—), 男, 博士, 教授, 主要从事气体激光器及激光技术等方面的研究。

E-mail: xbwang@mail.hust.edu.cn

1 引言

脉冲激光烧蚀固体表面产生等离子体,在元素痕量分析^[1]、薄膜制备^[2,3]、辐射光谱学^[4~6]、高能离子产生^[7]和 X 射线辐射^[8,9]等诸多方面有广泛的用途。长脉冲激光烧蚀可以分为三个阶段,首先,在极短的时间内(小于激光脉冲宽度)聚焦的激光束使材料表面物质迅速熔化蒸发、电离并形成等离子体;紧接着在脉冲持续时间内,材料表面的等离子体有效的吸收激光能量并作等温膨胀;最后,脉冲激光结束后,等离子体羽辉在真空中、背景气压下或外加电磁场中作绝热膨胀。目前,由于其高转换效率和低碎屑特性,脉冲放电 CO₂ 激光诱导锡靶产生等离子体极端紫外辐射被国际上广泛认为是下一代光刻技术中最有前途的光刻机光源^[10,11]。基于 CO₂ 激光锡等离子体极端紫外光刻光源的实验研究,在国内还未见公开报道。

本文对 CO₂ 激光作用于平板锡靶材激发的等离子体可见光波段的发射光谱进行了研究,使用光谱仪和像增强型电荷耦合器件(ICCD)采集了等离子体在延时 0.1~2.0 μs 区间的时间分辨光谱,针对 Sn II 的五条发射谱线,利用玻尔兹曼作图法和斯塔克展宽法计算了激光等离子体的电子温度和电子密度,得到了 CO₂ 激光锡等离子体的物理特性随时间变化的一些基本规律,等离子体参数特性的研究将有助于理解和优化光源的极端紫外辐射。此外,为了研究 CO₂ 激光锡等离子体光刻光源的极端紫外辐射特性,设计并建立了一套掠入射极端紫外平场光栅光谱仪,利用 X 射线 CCD 同时探测了光源在 6.5~16.8 nm 波段的时间积分辐射光谱,得到了极端紫外光谱的形状和一些基本特征。

2 实验装置

脉冲放电 CO₂ 激光烧蚀固体平板锡靶的实验装置及光谱测试装置如图 1 所示。驱动光源为横向激励大气压 CO₂ 激光器(波长 10.6 μm,重复频率 1 Hz),激光脉冲能量利用 Gentec ED500 能量计测量,脉冲时域波形通过光子牵引探测器和示波器记录测量,样品放置在可充、抽气的真空靶室内,真空靶室安装有机械泵和涡轮分子泵,真空度最高可达到 10⁻⁵ Pa。脉冲激光经 ZnSe 晶体窗口和焦距为 95.25 mm ZnSe 聚焦透镜以与靶面法线方向成 45°角入射到真空靶室的平板圆形高纯锡靶上(厚度 5 mm,直径 60 mm)。在平行于靶面的法线方向上,

等离子体羽辉的发射光谱信号经石英透镜成像耦合进裸光纤,光谱信号经光纤传输到聚焦长度为 750 mm 的光谱仪(Acton, SpectraPro-2750)的入射狭缝。光谱仪装有刻线密度分别为 300, 600, 2400 groove/mm 可转动的三面光栅,它包含了一个全波长的数字光栅扫描系统,并利用配套的辐射标定灯谱线对其进行波长校准,利用钨灯做可见光波段的光谱强度响应标定。利用 Tektronix 公司的 TDS7154B 数字示波器接受激光器腔内的放电干扰信号,外部同步触发 ICCD(Princeton Instrument, PI-MAX-1300)接受光谱信号,通过 USB 接口连接光谱仪与电脑,并利用软件 WinSpec/32 可以控制操作光谱仪与 ICCD 进行等离子体光谱的时序测量。为了研究锡等离子体的极端紫外辐射特性,本文设计建立了一套掠入射平场光栅光谱仪,主要由球面反射镜、平面反射镜、狭缝、变栅距凹面反射光栅、X 射线 CCD 以及相应的真空系统所组成,具体结构如图 1 所示。根据铯膜的透过率曲线,能够透过谱仪系统前安装的 500 nm 厚度铯膜的极端紫外光波段为 6.5~16.8 nm,对波长 13.5 nm 的光的透射率约为 18%,而紫外、可见光和红外辐射将全部被滤掉。

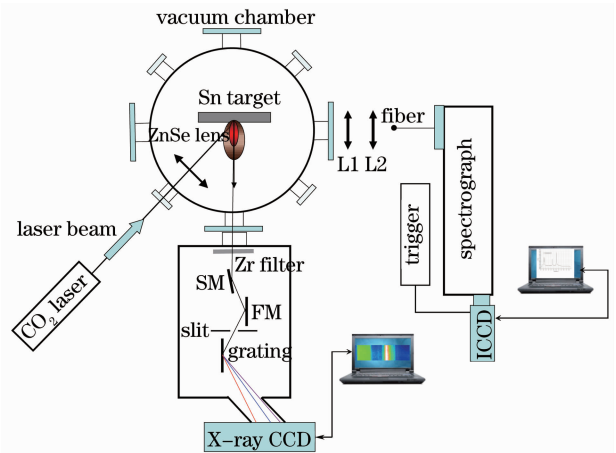


图 1 CO₂ 激光锡等离子体发射光谱及极端紫外辐射光谱测试实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of the experimental setup used for measurements of temporally resolved emission spectroscopy and extreme ultraviolet spectrum of CO₂ laser-produced tin plasma

3 实验结果与分析

脉冲放电横向激励大气压 CO₂ 激光放电电压为 22 kV,气压为 70 kPa,气体分压比为 $P_{\text{CO}_2} : P_{\text{N}_2} : P_{\text{He}} = 1:1:5$ 时,入射到靶面的单个激光脉冲能量约

为 400 mJ, 脉冲时域波形通过光子牵引探测器和示波器测量, 脉冲半峰全宽(FWHM)为 75 ns, 如图 2 所示。在 CO₂ 激光锡等离子体可见光波段时间分辨发射光谱测试的实验中, 真空靶室的气压控制在 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ Pa 的高真空范围内, ICCD 采用序列门控模式, 取样门宽设定为 30 ns, 取样延时时间间隔设定为 100 ns。利用图 1 所示的实验系统还进行了时间积分的极端紫外辐射光谱的测量, 最后对测得的数据进行记录和处理。为了减弱实验中激光能量和脉宽的波动对测试结果的影响, 所测量的光谱数据都进行了累加五次取平均的处理。

3.1 激光等离子体可见光波段发射谱线

在上述实验条件下, 测量了等离子体在可见光波段的多条发射谱线。图 3(a)、图 3(b) 是利用 300 groove/mm 的光栅测到在延时 1.0 μ s 时刻, 不同中心波长处的锡等离子体发射谱线。为了计算等

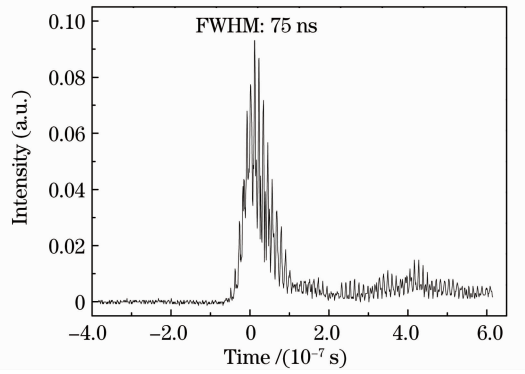


图 2 CO₂ 激光脉冲时域波形

Fig. 2 Temporal waveform of CO₂ laser pulse

离子体的电子温度和密度, 本文着重研究 Sn II 的五条发射谱线, 认证的谱线已标在图 3 中, 用于等离子体电子温度计算的 Sn II 谱线参数如表 1 所示, 数据来自 NIST 数据库^[12]。

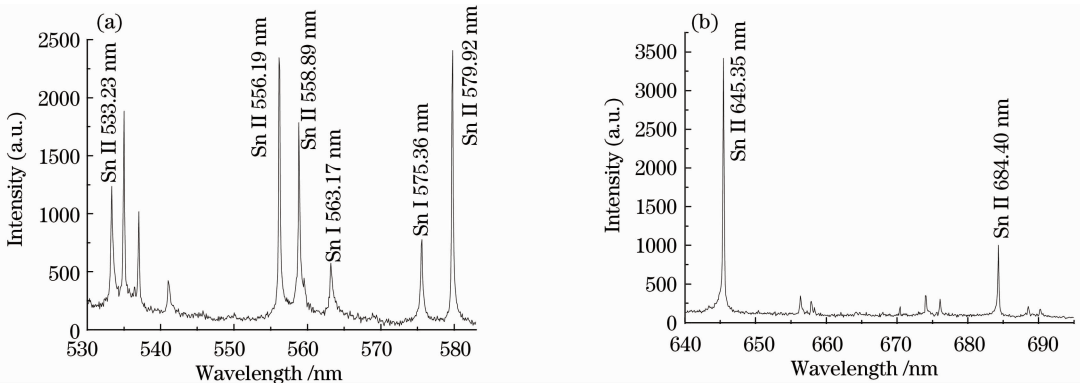


图 3 延时 1.0 μ s 不同中心波长处 CO₂ 激光锡等离子体谱线。(a) 中心波长 555 nm; (b) 中心波长 665 nm

Fig. 3 Typical emission spectra of the CO₂ laser-produced tin plasma at different central wavelengths and a delay time of 1.0 μ s in vacuum. (a) Central wavelength of 555 nm; (b) central wavelength of 665 nm

表 1 用于等离子体电子温度计算的 Sn II 发射谱线参数

Table 1 Parameters of Sn II emission lines for plasma electron temperature determination

Transition array Sn II	Wavelength λ_{ij} / nm	Energy E_i / eV (upper level)	g_i (upper level)	Transition probability $A_{ij} / (10^7 \text{ s}^{-1})$
$6d^2 D_{3/2} \rightarrow 6p^2 P_{1/2}$	533.23	11.201	4	8.6
$6d^2 D_{5/2} \rightarrow 6p^2 P_{3/2}$	556.19	11.215	6	12
$4f^2 F_{2/5} \rightarrow 5d^2 D_{3/2}$	558.89	11.08	6	8.5
$6p^2 P_{3/2} \rightarrow 6s^2 S_{1/2}$	645.35	8.984	4	12
$6p^2 P_{1/2} \rightarrow 6s^2 S_{1/2}$	684.40	8.87	2	6.6

3.2 激光等离子体电子密度和温度测量

原子或离子发射谱线的展宽与等离子体的电子密度有关, 主要的展宽机制有: 斯塔克展宽、多普勒展宽和仪器展宽。多普勒展宽的线性基本上是对称的高斯线型, 主要由粒子的高速飞行导致的多普勒频移造成, 即 $\Delta\lambda_D = \lambda v_z / c$ 。选用谱线 Sn II 579.92 nm

($5^2 D_{5/2} - 4^2 F_{7/2}$) 计算电子密度, 实验表明锡粒子的飞行速度在 10^6 cm/s 的数量级, 相应的多普勒展宽的 FWHM 约为 0.02 nm, 通过减小光谱仪的入射狭缝宽度在 10 μ m 左右可以将仪器展宽降低到 0.012 nm, 实验中我们测得的谱线展宽在 0.2 nm 左右。如果考虑到辐射原子是处于电子及离子包围之中, 则长程

库仑相互作用力占主导地位,从而引起谱线的斯塔克展宽。现有的斯塔克展宽理论主要有两种:一种是碰撞近似,处理快速运动粒子(如电子)对辐射原子所造成的瞬态微扰;另一种是准静态近似,处理缓慢运动粒子(如离子)所产生的准静态场对辐射原子的微扰。对于中性原子和一次电离的离子的谱线,谱线展宽主要由电子碰撞引起,离子准静态场对谱线加宽效应的贡献比电子碰撞小很多,可以忽略离子准静态场加宽。扣除多普勒展宽和仪器展宽后,可利用简化的斯塔克展宽 $\Delta\lambda_{1/2}$ 公式计算电子密度 n_e [13,14]

$$\Delta\lambda_{1/2} = 2W \left(\frac{n_e}{10^{17}} \right) \text{nm}, \quad (1)$$

式中 W 为与温度有关的电子影响参数,计算中谱线线型采用洛伦兹拟合,如图 4 所示。

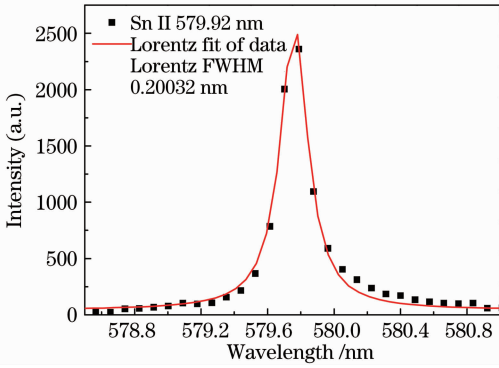


图 4 发射谱线 Sn II 579.92 nm 的洛伦兹拟合曲线

Fig. 4 Stark broadened profiles of Sn II 579.92 nm in vacuum, the smooth curve represents the fitted Lorentzian profile

在利用玻尔兹曼作图法计算电子温度时,需要假设等离子体处于局域热平衡态。激光诱导等离子体的膨胀是一个瞬变过程,在等离子体中,电子转移其能量到粒子的过程由电声弛豫时间制约,这一时间在亚皮秒至几十皮秒的量级。在纳秒量级的激光烧蚀实验中,由于等离子体中的电子-离子、电子-原子碰撞弛豫时间远小于等离子体膨胀时间,即使初始时电子的温度和离子温度差别很大,系统也能很快达到平衡。此时,等离子体中粒子的能级布居满足玻尔兹曼统计规律,电离态由萨哈方程决定,等离子体辐射能量密度满足普朗克辐射定律,等离子体可以认为处于局域热平衡态。McWhirter 判据 [15] 给出了等离子体处于局域热平衡态的最小电子密度

$$n_e \geq 1.4 \times 10^{14} T^{1/2} (\Delta E)^3 \text{cm}^{-3}, \quad (2)$$

式中 T 和 ΔE 分别为等离子体温度和谱线最大能级间隔,单位为 eV。考虑到最大能级间隔 $\Delta E = 2.345$ eV,

等离子体羽辉最高温度为 $T = 2.34$ eV,计算得出最小电子密度为 $2.75 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ 。在研究的时域范围内,通过谱线斯塔克展宽计算出的电子密度在 10^{16}cm^{-3} 的数量级,从而说明局域热平衡是一个较好的近似。激光烧蚀产生的等离子体在局域热平衡的条件近似下,对于处于不同电子态上的离子可用玻尔兹曼分布来描述。对于同一电离度的离子辐射的不同相对强度的谱线可以较为准确的定出电子温度。原子或离子束缚态布居数密度满足玻尔兹曼分布率,则

$$\frac{n_{i,Z}}{n_Z} = \frac{g_{i,Z}}{P_Z} \exp\left(-\frac{E_{i,Z}}{k_B T}\right), \quad (3)$$

式中 Z 表示电荷态(例如: $Z = 0$ 表示原子, $Z = 1$ 表示一阶电离离子), k_B 为玻尔兹曼常数, $n_{i,Z}$ 为布居数密度, $g_{i,Z}$ 为跃迁谱线上能级统计权重, $E_{i,Z}$ 为跃迁谱线上能级激发能量, P_Z 为配分函数。对于光学薄的等离子体并忽略自吸收效应,对于原子或同一电荷态的离子,从高能级 i 跃迁到低能级 j ,发射谱线的积分强度可以写为

$$I_Z = \frac{hc}{4\pi\lambda_{ij,Z}} A_{ij,Z} n_{i,Z} L, \quad (4)$$

式中 h 为普朗克常数, c 为光速, L 为辐射等离子体特征长度, $A_{ij,Z}$ 为跃迁几率, $\lambda_{ij,Z}$ 为发射谱线波长。联立(3)式和(4)式,并取自然对数,得到

$$\ln\left(\frac{I_Z \lambda_{ij,Z}}{g_{ij,Z} A_{ij,Z}}\right) = -\frac{1}{k_B T} E_{i,Z} + \ln\left(\frac{hcLn_Z}{4\pi P_Z}\right). \quad (5)$$

从(5)式看出,同一电荷态离子的谱线强度的对数值与该跃迁谱线上能级 $E_{i,Z}$ 成线性关系。因此,可以采用作图的方法根据直线的斜率确定等离子体温度,即玻尔兹曼作图法。根据表 1 中 Sn II 的五条跃迁谱线,图 5 给出了用于计算等离子体温度典型的玻尔兹曼曲线,线性拟合相关系数为 0.99。

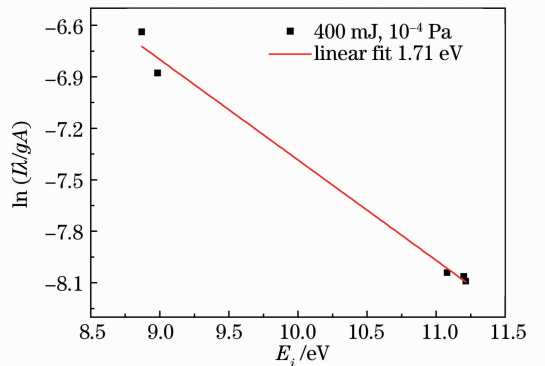


图 5 用于激光锡等离子体电子温度计算的玻尔兹曼图

Fig. 5 Typical Boltzmann plot used for estimating electron temperature of the laser-produced tin plasma

3.3 激光等离子体电子密度和温度的时间演化

实验中保持入射激光单个脉冲能量在 400 mJ 左右,在 ICCD 的序列门控模式下,测试了 CO₂ 激光锡等离子体的时间分辨发射光谱。如前所述,根据表 1 给出的相关谱线参数,利用谱线的斯塔克展宽和玻尔兹曼作图法计算了等离子体的电子密度和电子温度,图 6 给出了电子密度和电子温度随时间的变化曲线。值得注意的是,ICCD 的触发信号由示波器提供,其时间零点对应于放电开关触发时刻,这里为了叙述的方便,将时间零点移至等离子体点燃的时刻。在 CO₂ 激光锡等离子体膨胀的初期(小于 100 ns 的时间范围内),它的发射光谱主要由连续光谱构成,此后连续光谱强度逐渐减弱,线状光谱占主导地位,线状光谱的相对强度经历了明显的上升再到下降的过程。从图 6 可以看出,等离子体中的电子密度数量级为 10^{17} cm^{-3} ,当延时在 $0.1 \sim 2.0 \mu\text{s}$ 变化时,电子密度的变化范围为 $7.6 \times 10^{17} \sim 1.2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$,随延时的增加电子密度先急剧下降,0.4 μs 后减小到只有最大电子密度的约 1/8,随后开始缓慢减少并达到一个较低的水平。CO₂ 激光锡等离子体羽辉中的电子温度的数量级为 1 eV,电子温度随延时的变化规律与电子密度相类似,都经历了随延时急剧下降再到缓慢减小的一个过程,但是电子温度的变化趋势要相对缓慢一些。膨胀等离子体中电子密度的下降主要是由于三体复合和辐射复合过程导致的,复合速率系数和离子的平均电荷态 Z^* ,电子密度 n_e ,离子密度 n_i 及电子温度 T_e 有关,其中三体复合速率正比于 $n_e^2 n_i Z^{*3} T_e^{-9/2} \ln(Z^{*2} + 1)^{1/2}$,辐射复合速率正比于 $n_e n_i Z^{*2} T_e^{-3/4}$ 。

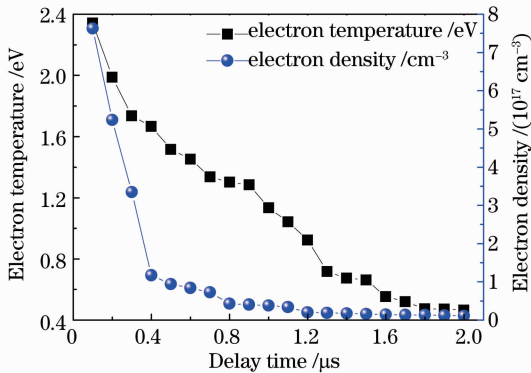


图 6 激光锡等离子体电子密度和电子温度随延时(0.1~2.0 μs)的变化

Fig. 6 Temporal variation in the electron density and temperature of the Sn laser-produced tin plasma plume with (0.1~2.0 μs) delay time

由此可见,初期的等离子体参数导致它的电子复合速率较大,电子密度会急剧下降,然后随着等离子体的膨胀再缓慢的减少。随着等离子体羽辉的膨胀,等离子体的内能会转化为膨胀动能和辐射能量,同时电子温度随延时的增加而减小。

3.4 CO₂ 激光锡等离子体极端紫外光谱

在上述实验条件下,利用图 1 所示的实验系统进行了等离子体的极端紫外辐射光谱的测试,图 7 给出了 CO₂ 激光诱导的平板锡靶等离子体的时间积分极端紫外光谱图及其原始谱图。从图中可以看出,锡等离子体的极端紫外谱的峰值中心波长位于 13.5 nm,其 FWHM 为 1.1 nm。锡激光等离子体所产生的 13.5 nm 波长的辐射主要来自高离化态 Sn 离子 ($\text{Sn}^{12+} - \text{Sn}^{8+}$) 的 4f-4d 以及 4d-4p 的不可分辨跃迁峰。CO₂ 激光锡等离子体要产生较强的 EUV 辐射,需要在一定的空间内(约几十微米)产生具有恰当的电子密度(约 10^{19} cm^{-3}),电子温度(约 30 eV)及离子丰度(大于 20%),且持续一定时间的均匀等离子体。因为延时 0.1 μs 以后测量得到的电子温度在 0.5~2.3 eV,将难以产生极端紫外辐射光,能够有效产生极端紫外辐射的时域应该是在脉冲激光作用时间之内。

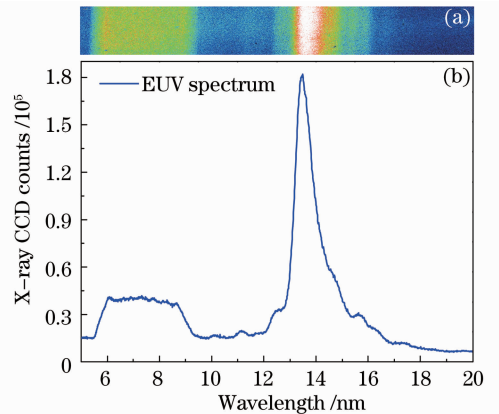


图 7 激光锡等离子体原始谱图(a)和极端紫外谱(b)

Fig. 7 Extreme ultraviolet spectrum (b) and raw image (a) of laser-produced tin plasma from a plate tin target

4 结 论

CO₂ 激光锡等离子体是下一代半导体光刻中最有前途的极端紫外光刻机光源,因为它能产生中心波长在 13.5 nm 附近的很强的极端紫外辐射。本文基于 10.6 μm 的 CO₂ 激光烧蚀平板 Sn 靶产生等离子体,分别利用可见光波段的光谱仪和自行设

计建立的 X 射线平焦场光栅光谱仪同时测试了等离子体光源的可见光发射光谱及极端紫外辐射光谱。利用 Sn II 的发射谱线的斯塔克展宽计算了电子密度,利用玻尔兹曼作图法计算了电子温度,得到了等离子体电子温度和密度随延时(0.1~2.0 μs)的变化规律,实验结果与理论分析是一致的。值得指出的是,在激光点燃等离子体的早期(小于 100 ns),由于连续辐射太强,线状谱不明显,利用发射光谱计算等离子体参数会非常困难,应寻求其它的诊断手段,如干涉法等。此外,利用平场光栅光谱仪,结合 X 射线 CCD 同时探测了锡等离子体在 6.5~16.8 nm 波段的时间积分极端紫外辐射光谱,今后我们将会进一步研究等离子体的极端紫外辐射的时域特性。脉冲 CO₂ 激光锡靶等离子体作为最有前途的极端紫外光刻机光源,为了提高极端紫外辐射转换效率和降低碎屑产量,等离子体发展物理过程和辐射特性的研究和优化至关重要,光谱分析法提供了一种简便有效的手段。

参 考 文 献

- 1 M. Sabsabi, P. Cielo. Quantitative analysis of aluminum alloys by laser-induced breakdown spectroscopy and plasma characterization [J]. *Appl. Spectroscopy*, 1995, **49**(4): 499~507
- 2 R. K. Singh, O. W. Holland, J. Narayan. Theoretical model for deposition of superconducting thin films using pulsed laser evaporation technique [J]. *J. Appl. Phys.*, 1990, **68**(1): 233~247
- 3 Y. Zhang, C. Chen, X. Zhou *et al.*. Influence of ambient pressure on properties and expansion of laser-induced plasma [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(8): 493~496
- 4 J. Hermann, C. Vivien, A. P. Carricato *et al.*. A spectroscopic study of laser ablation plasmas from Ti, Al and C targets [J].

- Appl. Surf. Sci.*, 1998, **127-129**: 645~649
- 5 Cong Ran, Zhang Baohua, Fan Jianmei *et al.*. Experimental investigation on time and spatial evolution of emission spectra of Al atom in laser-induced plasmas [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(9): 2594~2600
从 然, 张保华, 樊建梅 等. 激光诱导等离子体中 Al 原子发射光谱的时间、空间演化特性实验研究 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(9): 2594~2600
- 6 Gao Xun, Song Xiaowei, Guo Kaimin *et al.*. Optical emission spectral characteristics of glass plasma induced by nanosecond laser pulse [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(3): 0315002
高 勋, 宋晓伟, 郭凯敏 等. 纳秒激光烧蚀光学玻璃的等离子体发射光谱特性 [J]. *中国激光*, 2011, **38**(3): 0315002
- 7 O. Morris, A. O'Connor, E. Sokell *et al.*. Angular distribution of the ion emission from a tin-based laser-produced plasma extreme ultraviolet source [J]. *Plasma Sources Sci.*, 2010, **19**(2): 025007
- 8 Wang Ruirong, Chen Weimin, Dong Jiaqin *et al.*. High-resolution X-ray crystal spectrometer and its application in laser plasmas [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1220~1224
王瑞荣, 陈伟民, 董佳钦 等. 高分辨 X 射线晶体谱仪及其在激光等离子体中的应用 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(6): 1220~1224
- 9 X. Xiong, X. Zhong, S. Xiao *et al.*. Elliptically-bent crystal spectrograph for X-ray diagnosis of laser-produced plasmas [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(1): 27~28
- 10 Y. Matsuoka, Y. Nakai, S. Fujioka *et al.*. Comparative and quantitative study of neutral debris emanated from tin plasmas produced by neodymium-doped yttrium-aluminum-garnet and carbon dioxide laser pulses [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, **97**(11): 111502
- 11 Wu Tao, Wang Xinbing. Lifetime calculations on collector optics from laser plasma extreme ultraviolet sources with minimum mass [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2011, **28**(5): 055201
- 12 <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Handbook/Tables/tintable4.htm>
- 13 H. R. Griem. Principles of Plasma Spectroscopy [M]. New York: Cambridge University Press, 1997. 279~287
- 14 S. Djenize, A. Sreckovic, Z. Nikolic. On the Sn I and Sn II stark broadening [J]. *J. Phys. B: At. Mol. Opt.*, 2006, **39**(14): 3037~3045
- 15 R. W. P. McWhirter. Plasma Diagnostic Techniques [M]. New York: Academic press, 1965. 201~264

栏目编辑: 李文喆