

激光产生的硫等离子体 2s—2p 光谱及分析模拟

董晨钟, 张倩倩, 苏茂根, 敏琦, 王鹏展

(甘肃省原子分子物理与功能材料重点实验室,
西北师范大学 物理与电子工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 利用双脉冲激光等离子体光谱技术测量了激光作用于高纯度硫靶产生的 16~24 nm 波段的发射光谱, 分析发现谱线主要来自 S^{q+} ($q=7,8,9,10$) 离子的 2s—2p 跃迁. 基于稳态碰撞辐射模型和激发态离子数布局满足归一化玻尔兹曼分布的假设, 计算了不同电离态硫离子在不同等离子体温度和电子密度下的布居数, 在不同电子温度下模拟了等离子体光谱, 并通过与实验光谱比较确定了等离子体参数.

关键词: 激光等离子体; 高电离态硫离子; 发射光谱; 稳态碰撞辐射模型

中图分类号: O 562.3

文献标志码: A

文章编号: 1001-988X(2014)02-0030-05

Analysis and simulations of 2s—2p emission spectra of laser-produced sulfur plasmas

DONG Chen-zhong, ZHANG Qian-qian, SU Mao-gen, MIN Qi, WANG Peng-zhan

(Key Laboratory of Atomic and Molecular Physics & Functional Materials of Gansu Province,

College of Physics and Electronic Engineering, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: The emission spectra of highly ionized sulfur ions in the wavelength range of 16~24 nm have been measured by using the double pulse method, and the original of lines with the help of the NIST database have been analyzed. The results show that those lines arise from the transitions of 2s—2p from S^{7+} to S^{10+} ions. Based on the assumption of normalized Boltzmann distribution among the excited states and a steady-state collisional-radiative model, the populations of sulfur ions mentioned above have been estimated by choosing the different plasma parameters, such as plasma temperature and electron density. Finally, the optimum plasma parameters have been obtained by comparing the experimental spectra with the simulated ones under the different plasma temperature.

Key words: laser-produced plasmas; highly charged sulfur ions; emission spectra; the steady-state collisional-radiative(CR) model

硫元素广泛存在于大气、矿物和天体中, 在天体中硫的含量尤为丰富^[1]. 许多研究表明, 星体和行星体的光谱中都存在不同电离度的硫离子光谱^[2,3]. 如木星中最大的卫星木卫一, 其主要由硫和氧以及硫和氧的化合物组成. 在火山等离子体环中存在大量的硫离子、氧离子和氧化硫粒子, 这些

粒子和周围的电子碰撞时会发出 EUV 波段的光辐射^[4]. 因此, 对于天体等离子体状态的诊断需要大量的硫原子和高电荷态离子的光谱数据.

早期有关硫离子的光谱数据主要来源于束箔光谱技术. Christer 和 Lars 通过束箔光谱技术对 69~96 nm 波段内的 S^{8+} 离子的光谱进行了标定,

收稿日期: 2013-09-20; 修改稿收到日期: 2013-12-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11274254, 91126007, 11364037, 11064012); 甘肃省科技计划项目(1104WCGA186); 甘肃省高等学校基本科研业务费专项基金资助项目(1308RJZA166)

作者简介: 董晨钟(1962—), 男, 甘肃泾川人, 教授, 博士, 博士研究生导师. 主要研究方向为原子结构与光谱.

E-mail: dongcz@nwnu.edu.cn

并对 $2p^3 3l (l=s, p, d)$ 组态能级之间的跃迁谱线进行了标记^[5]；Pegg 等对 $S^{10+} - S^{12+}$ 离子 $n=2$ 组态能级之间的电偶极跃迁的辐射寿命和跃迁几率进行了测量^[6]；Trabert 和 Du 等也先后利用束箔光谱技术对 S^{12+} 离子 $n=2$ 组态能级之间的电偶极跃迁能级寿命进行了实验测量^[7,8]。Yang 等对 40 nm 以下硫离子束箔光谱进行了测量并进行了谱线识别；随后又测量了波长范围在 17~50 nm 的 $S^{8+} - S^{12+}$ 离子的束箔光谱，确定了来自上述硫离子的 54 条 2s—2p 跃迁谱线^[9-13]。

另外，也有少量采用激光等离子体光谱方法研究高电荷态硫离子的工作。Fawcett 等观测了波长在 2.2~7.3 nm 内的 $S^{6+} - S^{13+}$ 的光谱^[14]，Rojas 等利用激光作用于 ZnS 靶材上研究了组态 $3s^2 3p^2 4p$ 产生的 103 条光谱线^[15]。

本文利用双脉冲激光等离子体光谱技术研究了硫的 16~24 nm 波段的光谱，通过与 NIST^[16] 相关数据比较分析，发现实验谱线主要来自于 $S^{q+} (q=7, 8, 9, 10)$ 的 2s—2p 的跃迁，并基于稳态碰撞辐射模型^[17]和激发态离子数布局满足归一化玻尔兹曼分布的假设，对实验光谱进行了计算模拟，确定了等离子体参数。

1 实验方法

所采用的双脉冲激光等离子体光谱测量装置如图 1 所示。

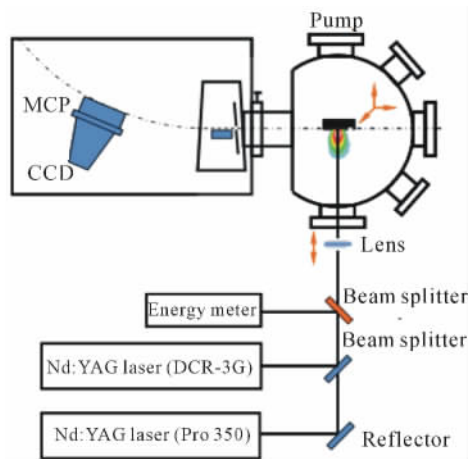


图 1 激光等离子体光谱实验装置

Fig 1 Schematic of experiment setup used in the laser produced plasma spectroscopic measurement

利用两台 Nd:YAG 脉冲激光器 (DCR-3G 和 PRO 350) 发出的激光脉冲 (波长 1 064 nm, 脉宽 10 ns) 经 40 cm 的石英透镜聚焦, 之后作用于高纯

度的硫靶上产生等离子体。为了确保两束激光并束后的焦点位于靶表面的同一位置，利用 He-Ne 激光器进行光路准直调节。硫样品靶放置于真空度为 3.4×10^{-4} Pa 的真空靶室中且被固定在一个四维移动平台上。为了避免激光在靶表面同一位置的重复烧蚀而影响实验的稳定性，通过移动平台控制箱 (MC600) 进行四维移动控制，使得每次烧蚀位置都是新的。激光烧蚀产生的等离子体光信号是利用掠入射型极真空紫外光谱仪 (Mcpherson248/310G) 进行测量，谱仪中的真空度为 5.2×10^{-4} Pa。

在实验测量过程中，初始触发信号、激光脉冲信号、谱仪探测器触发信号以及样品靶移动平台的同步调节至关重要。因此，脉冲函数发生器 (8116A) 被作为手动信号触发源，数字脉冲延迟产生器 (DG645) 被用于进行两束激光脉冲间以及激光脉冲与谱仪 CCD 探测器间的时序控制，而另外一台四通道数字脉冲延迟产生器 (DG535) 被用于 8116A, DG645 以及 MC600 信号间的同步触发。另外，示波器 (Tek3052C) 被用于系统中各路信号的精确调节，激光能量计 (Nova II) 被用于两束激光脉冲能量的实时监测。

实验中所用硫靶是由纯度为 99.999% 的硫颗粒 (H120920-0101Z) 经充分研磨、压制而成的圆柱状靶片，其厚度为 0.5 cm，直径为 3 cm。实验测量时光谱仪光栅为 600 grooves/mm，入射狭缝宽度为 15 μ m，有效分辨率为 0.07 nm。为了获得高的信号强度和信背比，谱仪探测延迟时间设为 500 ns，门宽设为 100 ns。

2 稳态碰撞辐射模型

碰撞辐射模型是一种描述等离子体中电荷态分布的模型^[14]。在等离子体内部，各种电离与复合过程决定着电荷态的分布。当电离速率大于复合速率时，束缚电子就会被逐渐剥离，离化度变高；反之，电离速率小于复合速率时，离化度降低。在分析激光等离子体中的电荷态分布时，若仅关心电离和复合过程达到平衡时的等离子体状态，其关系由下式给出^[14]

$$\frac{n_{z+1}}{n_z} = \frac{S(z, T_e)}{\alpha_r(z+1, T_e) + n_e \alpha_{3b}(z+1, T_e)}, \quad (1)$$

其中， z 为离化度； T_e 为电子温度； S, α_r 和 α_{3b} 分别为碰撞电离、辐射复合、三体复合的速率系数，

表达式分别为

$$S = \frac{9 \times 10^{-6} \xi_z (T_e / \phi_z)^{1/2}}{\phi_z^{3/2} (4.88 + T_e / \phi_z)} \exp(-\phi_z / T_e),$$

$$\alpha_r = 5.2 \times 10^{-14} (\phi_z / T_e)^{1/2} z \cdot$$

$$\left[0.429 + \frac{1}{2} \lg(\phi_z / T_e) + 0.469 (\phi_z / T_e)^{1/2} \right],$$

$$\alpha_{3b} = 2.97 \times 10^{-27} \xi_z / T_e \phi_z^2 (4.88 + T_e / \xi_z) s^{-1},$$

其中, ϕ_z 为电离势; ξ_z 为最外壳层的电子数目.

3 结果与讨论

3.1 实验光谱及辨认

图 2 给出了光谱范围为 16~24 nm 的硫等离子体光谱, 其中无阴影的是原实验光谱图, 有阴影的是扣除背景后的光谱图.

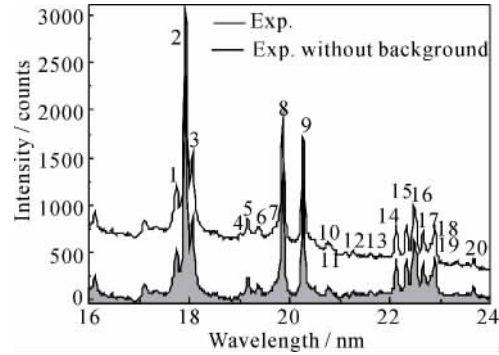


图 2 激光产生的硫等离子体发射光谱

Fig 2 Emission spectrum of laser-produced S plasma

为了确定图 2 中谱线的来源, 首先利用 Gauss 线型函数对光谱谱峰进行了轮廓分析, 并进一步借助于 NIST^[16] 数据库中的硫离子相关波长和能级数据, 进行了细致的比对分析. 最后共确定出 27 条硫离子谱线, 详细参数列于表 1.

表 1 S^{q+} 离子(q=7,8,9,10)的跃迁波长、能级和跃迁几率

Tab 1 Transition wavelength, energy levels and transition probabilities for S^{q+} ions(q=7,8,9,10)

Index	Wavelength/nm		Ion	Transitions				
	λ_{obs}	λ_{NIST}		Configuration	Term	J—J	Energy Level/cm ⁻¹	$A_{ki} / (\times 10^9 s^{-1})$
1	17.75	17.755 1	S ⁹⁺	2s ² 2p ³ —2s2p ⁴	² D— ² P	3/2—1/2	82 442.3~645 660	33.80
2	17.91	17.928 2	S ⁸⁺	2s ² 2p ⁴ —2s2p ⁵	¹ D— ¹ P	2—1	58 293.9~616 073	56.70
3	18.06	18.035 7	S ⁹⁺	2s ² 2p ³ —2s2p ⁴	² D— ² P	3/2—3/2	82 442.3~636 898	6.33
		18.073 3	S ⁹⁺	2s ² 2p ³ —2s2p ⁴	² D— ² P	5/2—3/2	83 594.9~636 898	38.30
4	19.02	19.036 0	S ¹⁰⁺	2s ² 2p ² —2s2p ³	¹ D— ¹ P	2—1	67 146.3~592 480	28.00
5	19.15	19.127 0	S ¹⁰⁺	2s ² 2p ² —2s2p ³	³ P— ³ S	2—1	12 388.1~535 220	25.30
6	19.37	19.347 7	S ⁹⁺	2s ² 2p ³ —2s2p ⁴	² P— ² P	3/2—1/2	128 804.0~645 660	14.80
7	19.61	19.610 8	S ⁹⁺	2s ² 2p ³ —2s2p ⁴	² P— ² P	1/2—3/2	126 975.0~636 898	2.27
7	19.70	19.681 4	S ⁹⁺	2s ² 2p ³ —2s2p ⁴	² P— ² P	3/2—3/2	128 804.0~636 898	7.64
8	19.85	19.855 3	S ⁷⁺	2s ² 2p ⁵ —2s2p ⁶	² P— ² S	3/2—1/2	0.0~503 644	24.60
9	20.26	20.261 0	S ⁷⁺	2s ² 2p ⁵ —2s2p ⁶	² P— ² S	1/2—1/2	10 085.0~503 644	11.50
		20.268 6	S ⁸⁺	2s ² 2p ⁴ —2s2p ⁵	¹ S— ¹ P	0—1	122 700.0~616 073	3.91
10	20.75	20.755 1	S ⁹⁺	2s ² 2p ³ —2s2p ⁴	² P— ² S	1/2—1/2	126 975.0~608 784	10.80
		20.762 0	S ⁹⁺	2s ² p ⁴ —2p ⁵	² D— ² P	3/2—1/2	520 723.0~1 002 372	19.40
11	20.82	20.834 2	S ⁹⁺	2s ² 2p ³ —2s2p ⁴	² P— ² S	3/2—1/2	128 804.0~608 784	12.00
12	21.25	21.253 0	S ⁹⁺	2s ² p ⁴ —2p ⁵	² D— ² P	3/2—3/2	520 723.0~991 249	2.59
		21.259 2	S ⁹⁺	2s2p ⁴ —2p ⁵	² D— ² P	5/2—3/2	520 864.0~991 249	17.40
13	21.60	21.597 0	S ¹⁰⁺	2s ² 2p ² —2s2p ³	¹ D— ¹ D	2—2	67 146.3~530 177	22.00
14	22.13	22.124 1	S ⁸⁺	2s ² 2p ⁴ —2s2p ⁵	³ P— ³ P	2—1	0.0~451 995	7.30
15	22.33	22.326 2	S ⁸⁺	2s ² 2p ⁴ —2s2p ⁵	³ P— ³ P	1—0	7 985.0~455 890	17.00
16	22.47	22.472 6	S ⁸⁺	2s ² 2p ⁴ —2s2p ⁵	³ P— ³ P	2—2	0.0~444 987	12.40
		22.522 0	S ⁸⁺	2s ² 2p ⁴ —2s2p ⁵	³ P— ³ P	1—1	7 985.0~451 995	4.12
17	22.66	22.657 9	S ⁸⁺	2s ² 2p ⁴ —2s2p ⁵	³ P— ³ P	0—1	10 648.0~451 995	5.37
18	22.82	22.816 4	S ⁹⁺	2s ² 2p ³ —2s2p ⁴	² D— ² D	3/2—3/2	82 442.3~520 723	11.60
19	22.88	22.869 2	S ⁹⁺	2s ² 2p ³ —2s2p ⁴	² D— ² D	5/2—5/2	83 594.9~520 864	11.00
		22.883 2	S ⁸⁺	2s ² 2p ⁴ —2s2p ⁵	³ P— ³ P	5/2—5/2	7 985.0~444 987	3.92
20	23.66	23.632 5	S ⁸⁺	2s ² p ⁵ —2p ⁶	¹ P— ¹ S	1—0	616 073.0~1 039 219	48.20

Note: λ_{obs} —the observed wavelength; λ_{NIST} —the calculated wavelength in NIST^[16]; A_{ki} —the transition probabilities in NIST^[16].

3.2 等离子体参数确定和光谱模拟

为了对实验光谱进行准确的分析，首先需要确定电子温度和电子密度。基于稳态的碰撞辐射模型^[17]，首先计算了不同电子密度下硫离子丰度随温度的变化。图 3 给出了不同电子密度条件下归一化的硫离子丰度随电子温度的演化曲线。可以看出，在实验光谱中的 S^{q+} ($q=7, 8, 9, 10$) 离子出现的电子温度范围约在 40~100 eV。随着电子密度的增大，电荷态较高的硫离子向电子温度较高的区域移动，而平均电荷态随着电子温度的升高而升高。

基于激发态离子数布局满足归一化玻尔兹曼分布的假设，借助于 NIST^[16] 数据库中的 S^{q+} ($q=7, 8, 9, 10$) 离子的波长、能级、跃迁几率等理论数据，并结合图 3 中离子丰度值，利用高斯线型函数对计算结果进行了卷积，在等离子体电子温度分别为

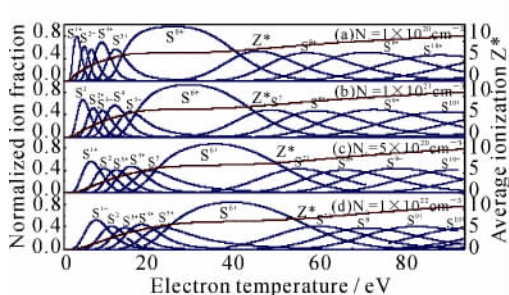


图 3 不同电子密度下的 S 离子丰度和平均电荷态随温度的变化关系

Fig 3 S ion stage population and average ionization as a function of electron temperature in different electron density

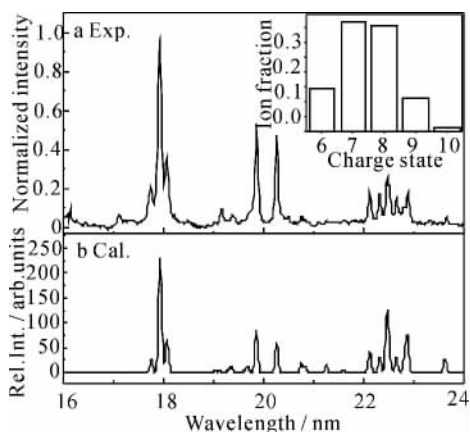


图 4 理论模拟光谱与实验光谱的比较

Fig 4 Comparison between simulated spectrum and experimental spectrum

57, 61 和 65 eV，电子密度分别为 1×10^{20} , 1×10^{21} , 5×10^{21} 和 $1 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ 时分别模拟了实验光谱。通过与实验光谱进行对比，最后发现在电子温度为 61 eV 和电子密度为 $5 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ 时，获得的模拟光谱与实验光谱最匹配，结果见图 4 所示。图 4a 为扣除背景后的实验光谱图，图 4b 为等离子体在电子温度为 61 eV，电子密度为 $5 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ 时计算所得的理论模拟光谱。据此，可以确定实验条件下的等离子体参数，即等离子体的电子温度为 61 eV，电子密度为 $5 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ 。

4 结论

利用双脉冲等离子体光谱技术测量了 EUV 波段的高离化态硫离子 16~24 nm 波段的发射光谱，利用 NIST 数据对谱线进行了标识，最后确定谱线主要来源于 S^{q+} ($q=7, 8, 9, 10$) 离子的 2s—2p 跃迁。利用稳态辐射模型和激发态粒子数布局满足归一化玻尔兹曼分布的假设，对实验所得光谱进行了计算模拟。通过分析比较最后得出等离子体的电子温度为 61 eV，电子密度为 $5 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ 。

参考文献：

[1] GIAMMANCO C, WURZ P, OPITZ A, et al. Sulfur abundance in the slow solar wind[J]. *The Astronomical Journal*, 2007, **134**: 2451-2454.

[2] GOLDSMITH S, OREN L, LEONAR C. The spectra of S X III and S X IV in the region 25~40 Å[J]. *The Astronomical Journal*, 1974, **188**: 197-200.

[3] ACTON L W, BRUNER M E, BROWN W A, et al. Rocket spectrogram of a solar flare in the 10~100 Å region[J]. *The Astronomical Journal*, 1985, **91**: 865-878.

[4] YOSHIOKA K, YOSHIKAWA I, TSUCHIYA F, et al. Feasibility study of EUV spectroscopic observation of the Io plasma torus from the earth-orbiting satellite EXCEED[J]. *Planetary and Space Science*, 2012, **62**: 104-110.

[5] CHRISTER J, LARS E. The 2p³3s, 3p and 3d configurations of eight times ionized sulphur, S IX [J]. *Physica Scripta*, 1997, **56**(6): 592-598.

[6] PEGG D J, ELSTON S B, GRIFFIN P M, et al. Radiative lifetimes and transition probabilities for

- electric dipole $\Delta n = 0$ transitions in highly stripped sulfur ions[J]. *Physical Review A*, 1976, **14**(3): 1036-1041.
- [7] TRABERT E, HECKMANN P H. Beam-foil lifetimes of Be-like ions of elements from Mg to S[J]. *Physica Scripta*, 1980, **22**: 489-492.
- [8] DU S B, YANG Z H, CHANG H W, et al. Life time measurements for electric-dipole $\Delta n = 0$ transitions in the Beryllium-like sulfur [J]. *Chin Phys Lett*, 2005, **22**(7): 1638-1640.
- [9] YANG Z H, WANG Y D, MA X W, et al. Spectra of highly ionized sulfur below 20 nm[J]. *Chin Phys Lett*, 2004, **21**(2): 287-290.
- [10] YANG Z H, MA X W, WANG Y D, et al. Highly ionized spectra of the transition sulfur [J]. *The Astronomical Journal*, 2000, **544**: 572-574.
- [11] YANG Z H, DU S B, CHANG H W, et al. Oscillator strength for $n = 2$ transitions in highly ionized sulfur[J]. *Chin Phys Lett*, 2005, **22**(5): 1099-1101.
- [12] YANG Z H, DU S B, ZENG X T, et al. Spectra for electric-dipole $\Delta n = 0$ transitions in highly ionized sulfur ions[J]. *The European Physical Journal D*, 2008, **47**: 33-36.
- [13] YANG Z H, DU S B, ZENG X T, et al. Sulfur IX to X spectral measurements between 170 and 500 Å [J]. *The Astronomical Journal*, 2009, **137**: 4020-4023.
- [14] FAWCETT B C, HAYES R W. Classification of sulphur VII to XIX spectra between 22 and 73 Å with wavelengths, oscillator strengths and energy levels [J]. *Physica Scripta*, 1987, **36**: 80-87.
- [15] ROJAS J A M, ORTIZ M, CAMPOS J. Experimental transition probabilities for lines arising from $3s^2 3p^2 4p$ configuration of single ionized sulfur [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 1999, **62**: 433-443.
- [16] National Institute of Standards and Technology. NIST[EB/OL]. [2013-11-2]. http://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html.
- [17] COLOMBANT D, TONON G F. X-ray emission in laser-produced plasmas [J]. *Journal of Applied Physics*, 1973, **44**: 3524-3537.

(责任编辑 孙对兄)

(上接第 29 页)

- [2] 韩旭里, 刘圣军. 二次 TC-Bézier 曲线[J]. 中南工业大学学报, 2003, **34**(2): 214-217.
- [3] 吴晓勤, 韩旭里, 罗善明. 四次 Bézier 曲线的两种不同扩展[J]. 工程图学学报, 2006, **27**(5): 59-64.
- [4] 刘植. Bézier 曲线的扩展[J]. 合肥工业大学学报, 2004, **27**(8): 976-979.
- [5] 吴晓勤. 带形状参数的 Bézier 曲线[J]. 中国图像图形学报, 2006, **11**(2): 269-274.
- [6] 胡钢, 秦新强, 刘哲, 等. Bézier 曲线的新扩展[J]. 计算机工程, 2008, **34**(12): 64-66.
- [7] 严兰兰, 梁丰. 形状可调二次 Bézier 曲线[J]. 东华理工大学学报, 2008, **31**(1): 93-97.
- [8] 严兰兰, 宋来忠. 带两个形状参数的 Bézier 曲线[J]. 工程图学学报, 2008, **29**(3): 88-92.

(责任编辑 马宇鸿)