

利用类铜离子谱线诊断银等离子体 电子密度*

黄 文 忠

(西南核物理与化学研究所, 成都 610003)

张 覃 鑫

(北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

何绍堂 谷渝秋 尤永录 江文勉

(西南核物理与化学研究所, 成都 610003)

(1994年9月2日收到)

测量了激光加热块状银靶产生的等离子体XUV光谱, 计算了 T_e 。分别为65eV, 86eV和130eV时, AgXIX 4s-4p, 4p-4d, 4d-4f 7条谱线在不同电子密度时的强度。根据 AgXIX 4d²D_{3/2}-4f²F_{7/2} 和 4p²P_{3/2}-4d²D_{3/2} 两条谱线的强度比, 推导了激光银等离子体电子密度。当入射激光功率密度 W 为 $6 \times 10^{12} \text{W/cm}^2$ 时, 银等离子体电子密度 $N_e = 1 \times 10^{20} / \text{cm}^3$ 。

PACC: 5270; 5250J; 3220

1 引 言

等离子体中的带电粒子有着各种复杂的相互作用, 它们所辐射出的谱线伴随有大量的等离子体信息。多年来, 等离子体光谱一直作为等离子体状态诊断的重要工具而被广泛采用。通常通过测量低 Z 元素 k 线特征线及其相关伴线得到有关等离子体参数, 进入80年代后, 随着实验室X射线激光工作的开展, 对中 Z 元素的等离子体光谱进行了较为深入的研究, 利用 L 线特征线诊断了等离子体的电子密度和电子温度^[1-3]。但迄今为止, 对高 Z 元素中等电离度等离子体光谱研究较少。Morley 等人在其进行的双爆炸箔光电离实验中也只是根据 PdXVII 和 PdXVIII 离子中的两条跃迁线强度对钯等离子体状态进行定性监测^[4]。

高 Z 元素中等电离度等离子体的状态诊断是一项十分重要而又具有相当难度的研究工作, 其发射光谱大都集中在 M 带和 N 带, 属于 XUV 光谱波长区域, 光谱特性和 K 线、 L 线有很大不同, 谱线强度在一定程度上受等离子体不透明度效应影响, 且这一谱段的高 Z

* 中国工程物理研究院科学基金资助的课题。

元素的原子数据缺少,无法事先确定选用何种线谱作为等离子体状态参量的诊断工具.针对这些特点,我们曾测量了激光产生的锗等离子体 XUV 光谱,根据测量结果选择类钠离子 $3p-3d$ 和 $3s-3p$ 跃迁线强度比诊断了激光锗等离子体电子密度^[9].

本文利用掠入射光栅谱仪轴向观测了激光银等离子体发射的 XUV 光谱,采用碰撞辐射模型计算了 AgXIX $4s-4p$, $4p-4d$, $4d-4f$ 7 条谱线在不同电子密度时的强度.理论模型中包括了 $n=5$ 的高激发态级联跃迁对于 $n=4$ 能级占据数的影响,还考虑了等离子体不透明度对谱线强度影响.根据 AgXIX $4d^2D_{3/2}-4f^2F_{7/2}$ 和 $4p^2P_{3/2}-4d^2D_{3/2}$ 两条谱线的强度比推导了激光银等离子体电子密度.

2 实验方法

实验在本研究所的“星光”装置上进行.“星光”装置为单路钕玻璃激光器,激光波长为 $1.06\mu\text{m}$,脉冲宽度为 600ps ,入射激光能量为 $3-10\text{J}$,焦斑直径为 $300\mu\text{m}$,靶面功率密度约为 $6 \times 10^{12}\text{W}/\text{cm}^2$.实验排布见图 1.一台

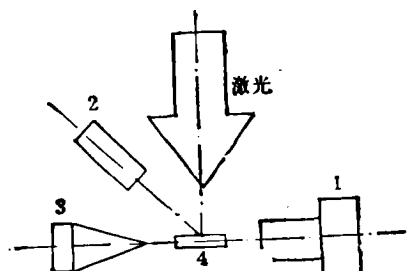


图 1 实验排布 1 为掠入射光栅谱仪;
2 为透射光栅谱仪;3 为针孔相机;4 为靶

掠入射光栅谱仪安置在靶的一端与入射激光方向垂直位置,用于测量银等离子体的 XUV 光谱.一台针孔相机安置在靶的另一端,也与入射激光方向垂直,测量入射激光焦斑,针孔相机空间分辨为 $20\mu\text{m}$.一台具有一维空间和一维能谱分辨的针孔透射光栅谱仪安置在与入射激光方向成 25° 位置,监测等离子体发射光谱的谱带及其存在的空间尺度,通过各谱带的相对强度,定性粗估各电离态离子丰度的相对分布.透射光栅谱仪测谱范围为 $0.5-12\text{nm}$,空间分辨为 $40\mu\text{m}$,谱分辨为 0.5nm .掠入射光栅谱仪测谱范围为 $2-30\text{nm}$,谱分辨为 0.005nm ,光栅刻线为 1200 条/ mm ,光栅表面镀铂,闪耀角为 $2^\circ 15'$,谱仪入射角为 88° ,狭缝宽为 $10\mu\text{m}$,距靶心 40mm ,光栅曲率半径为 998.8mm .

实验用靶为块状银靶,置于靶室中心位置,为进行波长标定,还使用了碳、锗等元素靶.

谱线由 kodak SWR 底片记录,单发打靶获取数据.谱线位置由 3CS 黑密度计按照 $10:1$ 比例扫描底片得到.谱线测量时,以 C^{4+} , C^{5+} 及 GeXXII 中的强线作为参考线,采用正交多项式拟合法定出银离子谱线波长,并阐明跃迁组态.谱线的相对强度根据其黑密度值按照底片响应曲线确定.

3 谱线强度的理论计算

由于 AgXIX 离子外壳层只有一个电子,其光谱结构比较简单,在较大的人射激光功率密度范围内都有较强的谱线发射. AgXIX 离子的基态能级为 $4s^2S_{1/2}$,基态和第一激发态 $4p^2P_{3/2}$ 能态间的能量差为 47eV ,在激发态和 $4d-4f$ 间的能量差也处于同一数量级.而

根据流体力学方程计算的本次实验条件下的电子温度约为 100eV。由于激光等离子体的电子密度较高, 激发态之间的原子过程相当重要, 因此, 在 AgXIX 离子光谱中, 除了 4s-4p 跃迁线外, 还应有较强的 4p-4d 和 4d-4f 谱线发射。我们选择计算了 4s-4p, 4p-4d 和 4d-4f 跃迁中的 7 条电偶极跃迁线在 $(10^{17}-10^{22})/\text{cm}^3$ 电子密度时的谱线强度。这 7 条谱线分别以 a, b, c, d, e, f, g 标志。其组态、波长和吸收振子强度见表 1^[4]。

在光性薄等离子体条件下, 谱线发射强度

$$I_j = N_i A_j (\text{photons} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}), \quad (1)$$

表 1 谱线参数

谱 线	组 态	波长/nm	log gf
a	$4s^2S_{1/2}-4p^2P_{3/2}$	26.357	-0.02
b	$4s^2S_{1/2}-4p^2P_{1/2}$	31.813	-0.41
c	$4p^2P_{1/2}-4d^2D_{3/2}$	17.302	0.19
d	$4p^2P_{3/2}-4d^2D_{3/2}$	19.054	0.41
e	$4p^2P_{3/2}-4d^2D_{5/2}$	19.498	-0.56
f	$4d^2D_{3/2}-4f^2F_{5/2}$	18.394	0.41
g	$4d^2D_{5/2}-4f^2F_{7/2}$	18.775	0.56

式中 N_i 为第 i 能级的离子数密度, A_i 为自发辐射跃迁几率。在电子碰撞激发、碰撞退激发和自发辐射衰变占主要的原子物理过程中, 离子耦合方程为

$$N_i \left[\sum_{j>i} A_{ji} + N_e \left(\sum_{j>i} C_{ji}^d + \sum_{j<i} C_{ji}^c \right) \right] = N_e \left[\sum_{j<i} N_j C_{ji}^c + \sum_{j>i} N_j C_{ji}^d \right] + \sum_{j>i} N_j A_{ji}, \quad (2)$$

式中 C_{ji}^c, C_{ji}^d 为碰撞激发系数, C_{ji}^c, C_{ji}^d 为碰撞退激发系数, N_e 为电子密度, 其余符号意义同前。

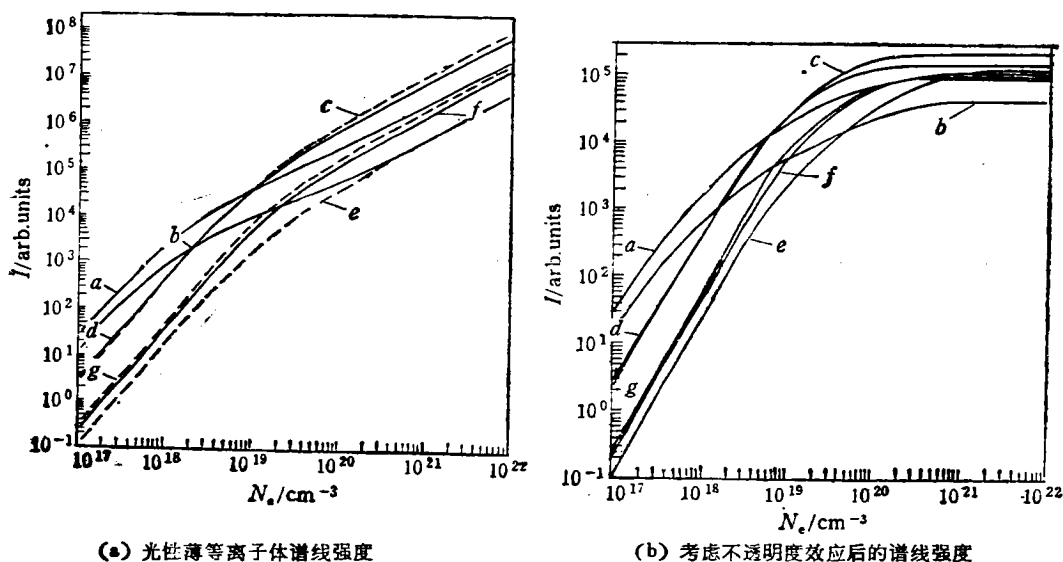


图 2 谱线强度随电子密度变化曲线 $T_e = 130\text{eV}$

根据碰撞辐射模型由方程(1)和(2)计算了表 1 所述 7 条谱线在 $T_e = 65\text{eV}$, 86eV , 130eV 时, 谱线强度随电子密度的变化曲线。

考虑到等离子体的不透明度效应, 谱线强度应表示为

$$I_i = N_i P_i A_i \quad (\text{photons} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}), \quad (3)$$

逃逸几率^[7]

$$P_i = (3\tau)^{-1} \{1 + \exp(-\tau)(2\tau - 1) + 2\pi\tau^{3/2}[\text{erf}(\tau^{1/2}) - 1]\}, \quad (4)$$

式中 τ 为 Sobolev 光学厚度, $\text{erf}(\quad)$ 表示误差函数,

$$\tau = \left(\frac{1}{8\pi}\right) \frac{g_u}{g_l} \cdot A_{ul} \cdot \lambda_{ul}^2 \left(N_l - \frac{g_l}{g_u} N_u\right) \cdot \frac{c}{\gamma_{ul} \left(\frac{dv}{dx}\right)}, \quad (5)$$

式中 g 为统计权重, λ 为谱线波长, c 为光速, ν 为频率, u, l 分别表示上、下能态, dv/dx 为垂直于靶面的速度梯度。

图 2 为计算的谱线强度随电子密度的变化曲线, 横坐标为电子密度, 纵坐标为谱线强度, 其中(a)为光性薄等离子体结果, (b)为考虑不透明度效应后的计算结果。

4 结果与讨论

由图 2 可知, 光性薄等离子体谱线强度一直随电子密度增加而增加。而考虑了等离子体不透明度效应的谱线强度则有所不同。当等离子体电子密度 $N_e < 10^{19}/\text{cm}^3$ 时, 等离子体可近似作为光学薄处理。当 $N_e > 10^{19}/\text{cm}^3$ 时, 则要考虑等离子体的不透明度效

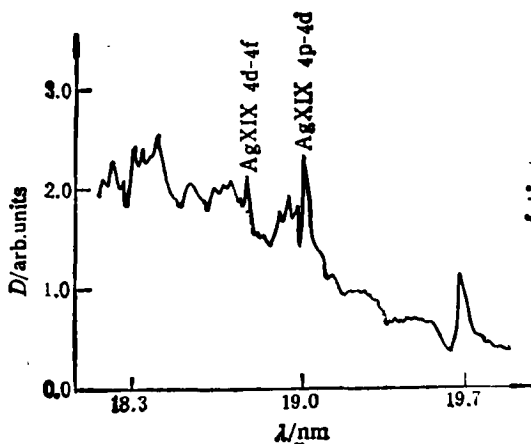


图 3 部分 XUV 光谱微密度计曲线

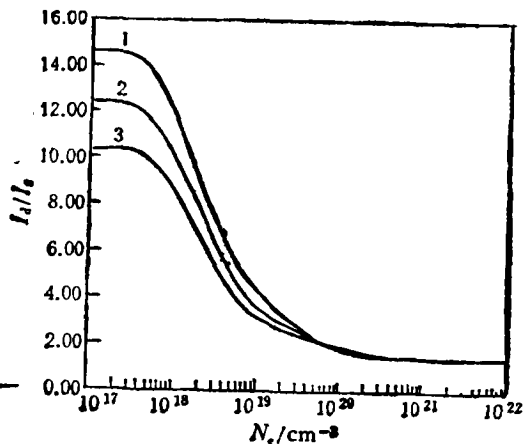


图 4 d 线和 g 线强度比变化曲线 曲线 1 为 $T_e = 65\text{eV}$; 曲线 2 为 $T_e = 86\text{eV}$; 曲线 3 为 $T_e = 130\text{eV}$

应。当电子密度 $N_e > 10^{21}/\text{cm}^3$ 时, 尽管电子密度增加, 谱线强度却基本不变。在本文实验条件下, 观测到 c, d, f, g 等谱线, 各谱线相对强度与图 2(b) 中 N_e 为 $10^{20}/\text{cm}^3$ 左右时的结果一致。由于光栅闪耀角为 $2^\circ 15'$, 谱仪对 a, b 线的探测灵敏度较其余线低, 故未观测到 a 线。图 3 为实验测得的部分 XUV 光谱微密度计径迹。从图 3 中可以看出,

AgXIX 离子的 d 线和 g 线发射较强, 且与其他谱线混合。这两条谱线的能量非常接近, 利用这两条谱线强度比进行等离子体电子密度诊断时, 无需考虑测量系统的灵敏度校正。以 I_d 表示 d 线强度, I_g 表示 g 线强度, 当电子温度 T_e 分别为 65eV, 86eV, 130eV 时, 其比值 R 随电子密度的变化曲线见图 4。由图 4 可知, 当电子密度 $N_e > 5 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ 时, R 对 T_e 不灵敏。当 $N_e < 3 \times 10^{17}/\text{cm}^3$, $N_e > 3 \times 10^{20}/\text{cm}^3$ 时, R 分别趋于定值。因而利用 d 线和 g 线的强度比可以诊断 $3 \times 10^{17}/\text{cm}^3 - 3 \times 10^{20}/\text{cm}^3$ 内的银等离子体电子密度。当 $R < 1.5$ 时, 只能定性认为 $N_e > 4 \times 10^{20}/\text{cm}^3$, 不能准确界定电子密度值。在本文实验典型打靶条件下, 当入射激光功率密度为 $6 \times 10^{12} \text{W}/\text{cm}^2$ 时, 实验测得 d 线和 g 线比值 $R = 1.75$ 。由图 4 得到等离子体电子密度 N_e 为 $1 \times 10^{20}/\text{cm}^3$ 。

- [1] J. Bailey *et al.*, *J. Phys. B*, 19(1986), 2639.
- [2] W. H. Goldstein *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, 58(1987), 2300.
- [3] K. R. Karim *et al.*, *Phys. Rev.*, A45(1992), 3932.
- [4] P. D. Morley *et al.*, *Appl. Phys.*, B50(1990), 173.
- [5] 黄文忠等, 强激光与粒子束, 5(1993), 464.
- [6] E. Biemont, *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 39(1988), 157.
- [7] B. L. Whitten, R. A. London and R. S. Walling, *J. Opt. Soc. Am.*, B5(1988), 2537.

DIAGNOSTICS OF ELECTRON DENSITY OF LASER-PRODUCED PLASMA FROM THE XUV SPECTRA OF AgXIX

HUANG WEN-ZHONG

(Southwest Institute of Nuclear Physics and Chemistry, Chengdu 610003)

ZHANG TAN-XIN

(Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088)

HE SHAO-TANG GU YU-QIU YOU YONG-LU JIANG WEN-MIAN

(Southwest Institute of Nuclear Physics and Chemistry, Chengdu 610003)

(Received 2 September 1994)

ABSTRACT

The XUV spectra from AgXIX of laser-produced plasma are measured. The density dependence of $\Delta n = 0$ ($4-4$) transitions from AgXIX has been studied in a density range $10^{17} - 10^{22} \text{cm}^{-3}$ with the collisional radiative model. The theoretical model included the effect of cascading from $n = 5$ states on the population of the $n = 4$ levels. In addition, optical depth effects on the line intensities were considered. The two transitions of $4d^2D_{5/2} - 4f^2F_{7/2}$ and $4p^2P_{3/2} - 4d^2D_{5/2}$ remain close to each other and are unblended with other lines. Calculations of their radiation intensity ratio vs the electron density are performed. Electron density of laserproduced plasma has been deduced from the ratio.

PACC: 5270; 5250J; 3220