

文章编号: 1001-4322(2006)05-0789-06

金激光等离子体冕区电离态特性研究*

张继彦, 郑志坚, 杨国洪, 杨家敏, 汪 艳, 韦敏习, 胡广月, 张文海, 丁耀南

(中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 提出一种测量金激光等离子体电荷态分布与平均电离度的 X 射线光谱学诊断方法。该方法基于稳态碰撞-辐射近似, 考虑电子离子直接碰撞激发与双电子复合两种激发态布居方式, 建立了金 M 带 5f-3d 跃迁组辐射总强度与离子态分布的耦合方程。根据实验测量的金平面靶激光等离子体冕区辐射的 5f-3d 跃迁线系的强度分布, 诊断得到了金激光等离子体的电荷态分布与平均电离度。此外, 还分析了电子温度、电子密度以及双电子复合过程对电荷态分布及平均电离度诊断的影响, 并将实验诊断结果与辐射流体学理论模拟结果及离化平衡动力学计算结果进行了对比分析。结果表明: 实验诊断结果与基于 CRE 近似的离化平衡动力学计算结果近似; 当电子温度高于 1.5 keV 时, 双电子复合过程对电离度的诊断结果影响较小。

关键词: 惯性约束聚变; 激光等离子体; 电离度; X 射线谱

中图分类号: O536; O562.3 **文献标识码:** A

在激光间接驱动惯性约束聚变中, 先利用强激光加热高 Z 材料柱腔并产生高温辐射场, 然后通过辐射烧蚀机制对燃料靶丸进行内爆压缩。靶丸的压缩与内爆取决于黑腔的辐射特性, 而黑腔辐射特性与腔内等离子体环境, 如等离子体电子温度、密度以及电离状态等诸多因素密切相关。为了准确了解黑腔辐射特性, 需要详细计算高 Z 壁等离子体的复杂离化平衡过程, 并对计算结果的精确性进行实验检验。

根据文献[1-2]建议的 X 射线光谱学方法, 本文提出了一种测量惯性约束聚变黑腔等离子体离化分布的诊断模型。该模型通过测量金 M 壳层的 5f-3d 跃迁辐射光谱, 根据不同离化度离子的 5f-3d 跃迁组的相对强度诊断得到等离子体的离化分布与平均离化度。对于高 Z 等离子体, 由于离子组态结构复杂, 每一个跃迁组所包含的谱线数量庞大, 对每条谱线逐一进行计算的工作量非常大。为了研究高 Z 等离子体的复杂光谱结构, Bauche 等人提出了基于组态统计平均方法的不可分辨跃迁组模型(UTA)^[3]。在 UTA 模型中, 将两个组态之间的所有单电子跃迁看作一个跃迁组, 跃迁组的平均跃迁波长、总强度以及半宽度由每一条跃迁线的波长、强度统计给出。UTA 模型简化了具有复杂组态结构的离子跃迁光谱的计算, 在不逐一考虑每一条跃迁线细节的情况下, 给出一组谱线的平均波长、半高全宽度、总强度等统计光谱学特征。近十几年的研究证明^[4-7], UTA 模型在描述中高 Z 等离子体的光谱特性, 特别是中高 Z 元素跃迁线系的总强度方面, 是非常成功的。

对于金 M 壳层的 5f-3d 跃迁组, 其上能级多处于自离化态, 这些能级的布居主要有两种机制, 即离子自身的内壳层电子直接激发以及相邻高阶离子的双电子复合。内壳层电子直接激发发生在一个电子与一个低激发态离子的碰撞过程中, 离子的一个内壳层电子被激发, 同时入射电子损失部分动能, 但仍处于自由态的原子物理过程; 而在双电子复合过程中, 入射电子将离子的一个束缚电子激发, 自身则损失全部动能而被俘获到离子的束缚轨道。显然, 内壳层电子直接碰撞激发需要入射电子有足够的动能, 即至少要大于将离子激发到自电离能级的激发能才不至于被俘获; 双电子复合则没有这样的能量限制, 入射电子与离子本身就构成了一个具有连续能级电子占据的系统, 在入射电子动能较小时也可以通过双电子俘获转移到自电离能级。因此, 对内壳层电子直接碰撞激发而言, 等离子体温度越高越有利; 而双电子复合在低温高密度等离子体中占有明显优势。

我们建立了基于自旋-轨道劈裂 UTA 模型的金等离子体发射光谱模型, 提出了不同离化度离子的 5f-3d 跃迁组辐射强度与其相对占据数的耦合方程组, 根据实验光谱强度推断得到了等离子体中各种离子的份额以及等离子体的平均电离度, 分析了影响实验诊断结果的各种因素。其中, 诊断模型中涉及到对电子离子直接碰撞激发与双电子复合等原子物理过程反应速率的计算, 计算这些参数需要首先知道等离子体的电子温度和电子密度^[8]。

* 收稿日期: 2005-11-11; 修订日期: 2006-02-13

基金项目: 国家自然科学基金资助课题(10275056)

作者简介: 张继彦(1971—), 男, 副研究员; 主要从事等离子体物理研究; zhangjiyanzy@sina.com。

1 实验安排

采用激光-金平面靶等离子体来近似代替金柱腔靶等离子体,实验安排如图 1 所示。3 倍频 Nb 玻璃激光以接近正入射方式聚焦照射金平面靶(靶面法线与入射激光光轴成 5° 夹角),激光能量为 60 J,脉宽为 0.7 ns;靶直径为 $\phi 800 \mu\text{m}$,厚度为 $20 \mu\text{m}$ 。当靶面被激光加热后,产生等离子体并沿靶面法线向外喷射,喷射等离子体在靶面形成准 1 维的等离子体柱。等离子体柱在电子密度低于临界值($N_e \approx 10^{21} / \lambda^2 \text{cm}^{-3}$)的区域吸收并沉积激光能量,形成沿靶面法线向外、密度单调减小的低密度高温冕区。理论数值模拟表明,当激光功率密度大于 $10^{14} \text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时,冕区电子温度可以达到 1.0 keV 以上,这时金原子将被离化到 M 壳层附近,并辐射金 M 带光谱。实验中,将激光聚焦成直径约为 $\phi 200 \mu\text{m}$ 的圆斑,靶面激光强度达到 $2.7 \times 10^{14} \text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$,满足发射 M 带辐射光谱的驱动条件。对金平面靶激光等离子体,冕区是辐射 M 带 X 射线的主要区域,并且基本上是光学薄的(光学厚度远小于 1),因此可以忽略辐射自吸收效应。实验产生的金激光等离子体可以近似看成准 1 维分布的等离子体柱,即等离子体状态在靶面法线方向才有明显的梯度分布。而沿靶面方向,除了边缘很窄区域存在较大梯度外,大致上是等温等密度的。因此,在实验中,通过侧向观测方式,就可以得到金平面靶激光等离子体在靶面法线方向的空间分辨发射光谱。因为在轴向的每一空间位置,等离子体状态是确定的,因此可以进行等离子体状态诊断。其中,采用缝宽 $20 \mu\text{m}$ 的狭缝对等离子体柱进行空间分辨成像,采用 PET 衍射晶体进行分光并用 X 光胶片记录实验光谱。此外,测量过程中采用厚度 $20 \mu\text{m}$ 的 Be 滤片屏蔽杂散光,并对入射 X 光进行衰减。

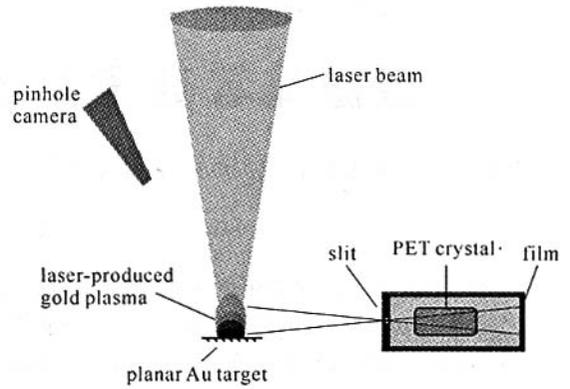


Fig. 1 Schematic diagram of interaction of laser with Au planar target

图 1 金平面靶激光等离子体 M 带发射光谱测量实验布局

2 数值模拟

采用 1 维辐射流体力学程序 Multi-1D 对金平面靶激光等离子体的参数特性进行了数值模拟。数值模拟的初始条件如下: Au 平面靶厚度为 $1 \mu\text{m}$,入射激光功率密度为 $2.7 \times 10^{14} \text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$,激光脉宽为 0.7 ns。其中,入射激光的时间波形具有如下形式

$$P(t) = P_0 \sin^2(\pi t / 2\tau) \quad (1)$$

式中: τ 为激光脉冲宽度; P_0 是峰值强度。在数值模拟计算中,对电子热传导的处理采用经验公式,通过引入限流因子对经典热传导模型进行修正,其中限流因子 f 取为 0.03。此外,在 Multi-1D 程序中,采用基于局域热动平衡(LTE)条件的辐射不透明度数据和双温近似,即物质温度(电子温度与离子温度相同)与辐射温度处于各自平衡、彼此脱离的状态。

计算结果表明,在激光照射靶面 0.7 ns 后,冕区电子温度达到最大值 1.68 keV,此后逐渐降低。图 2 给出了在激光强度 $I_L = 2.7 \times 10^{14} \text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 条件下, $t = 0.7 \text{ns}$ 时刻金平面靶激光等离子体的电子温度、电子密度以及平均离化度空间分布的数值计算结果,图中横轴给出了金平面靶的 Lagrange 网格坐标。可以看出,等离子体冕区(网格点在 68~72 范围内)电子温度 T_e 在 1.50~1.68 keV 之间,电子密度 N_e 在 $10^{21} \sim 10^{22} \text{cm}^{-3}$ 范围内,等离子体平均电离度 Z^* 大约为 73。

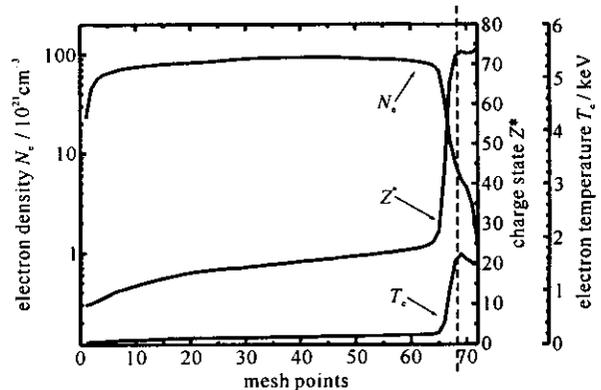


Fig. 2 Parameters of laser-produced gold plasma calculated by numerical simulation

图 2 金平面靶激光等离子体状态参数的数值模拟结果

3 理论模型

金激光等离子体 M 带辐射谱线的激发机制主要有两种。

(1) 当辐射跃迁上能级处于自电离化态时,除了考虑电子离子直接碰撞激发对自电离化能级的占据外,还必须考虑双电子复合机制。金元素类 Cu、类 Zn、类 Ga、类 Ge 等离子的 5f-3d 跃迁组就属于这种情况。根据 Bauche 等人提出的 UTA 模型^[3],对于从自电离化组态 C' 到基态 C 的辐射跃迁组,可以将总发射强度表示成如下形式

$$I' = N_g N_e \sum_{J' \in C'} Q_{g \rightarrow J'} \frac{A_{J' \rightarrow g}^r}{\sum_{J''} A_{J' \rightarrow J''}^r + \sum_k A_{J'k}^a} + N_i N_e \sum_{J' \in C'} \beta_{J \rightarrow J'} \frac{A_{J' \rightarrow g}^r}{\sum_{J''} A_{J' \rightarrow J''}^r + \sum_k A_{J'k}^a} \quad (2)$$

式中:右边第 1 项表示内壳层碰撞激发的贡献,其中 N_g 表示电离度为 Z 的离子基态布居数; N_e 表示电子数密度; $A_{J' \rightarrow g}^r$ 表示从激发态 J' 到基态 g 的辐射跃迁几率; $A_{J' \rightarrow J''}^r$ 表示从激发态 J' 向低激发态或基态的辐射跃迁几率; $A_{J'k}^a$ 表示激发态 J' 的自电离速率; $Q_{g \rightarrow J'}$ 表示电子离子碰撞激发速率系数;右边第 2 项表示电离度为 $Z+1$ 的离子通过双电子复合过程占据电离度为 Z 离子的自电离化能级,从而对该激发能级的辐射跃迁的贡献,其中 N_i 表示电离度为 $Z+1$ 离子的布居数, $\beta_{J \rightarrow J'}$ 表示双电子复合速率系数。

(2) 当上组态为非自电离化态时,则双电子复合对上能级的占据无贡献,上能级主要通过电子离子碰撞激发占据。金元素类 Co 离子与类 Ni 离子的 5f-3d 跃迁就属于这种情况。这时跃迁组(跃迁线)的总强度可表示成如下形式

$$I' = \sum_{J \in C} \sum_{J' \in C'} n_{J'} A_{J' \rightarrow J}^r = n_e \sum_{J \in C} n_J \sum_{J' \in C'} Q_{J \rightarrow J'} \frac{A_{J' \rightarrow J}^r}{\sum_{J''} A_{J' \rightarrow J''}^r} \quad (3)$$

综合上述情况,对类 Co 与类 Ni 离子的 5f-3d 跃迁,只考虑电子直接碰撞激发的贡献,对类 Cu、类 Zn、类 Ga 与类 Ge 离子,除了电子直接碰撞激发外,还考虑双电子复合的贡献,并且用每种离子的基态与低激发态离子布居数近似替代离子总数。这时,可以将金等离子体 M 带不同离子的辐射跃迁组强度用如下线性方程组来表示

$$\begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_{33} & C_{34} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & C_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} N_1 \\ N_2 \\ N_3 \\ N_4 \\ N_5 \\ N_6 \end{pmatrix} \quad (4)$$

式中:左边列矩阵元 $I_1 \sim I_6$ 分别表示从金元素类 Ge 离子到类 Co 离子的 $5f_{5/2}-3d_{3/2}$ 跃迁组强度;等式右边系数矩阵中对角元部分表示电子离子直接碰撞激发的贡献,非对角元部分表示双电子复合、光激发以及其它激发布居机制的贡献。在本工作中,非对角元部分仅考虑了双电子复合部分,忽略其余部分(取为 0)。对类 Co 离子,上能级为非自电离化态,故仅保留对角元部分;对类 Ni 离子,上能级也非自电离化态,故双电子复合部分也为零,即式中 $C_{56}=0$ 。等式右边的列矩阵元 $N_1 \sim N_6$ 表示从金元素类 Ge 离子到类 Co 离子的相对离子数密度。求解式(4)可得到各离子相对布居数,即各类离子的离子丰度。

准确求解离子布居数的关键是算准系数矩阵并得到准确的实验跃迁组强度。在实际工作中,对于电子离子碰撞激发速率系数,采用经验公式计算得到。对于双电子复合过程速率系数,则采用 Bauche 等人的组态平均模型计算得到。

4 光谱分析

实验测量的金 M 带 5f-3d 跃迁辐射光谱如图 3 所示。从图中可以看出,在波长区间 0.34~0.39 nm,主要的光谱特征是一系列叠加于连续辐射本底之上的、展宽了的光谱峰。结合原子物理计算的光谱分析表明,这些光谱峰属于从类 Ge 离子到类 Co 离子的

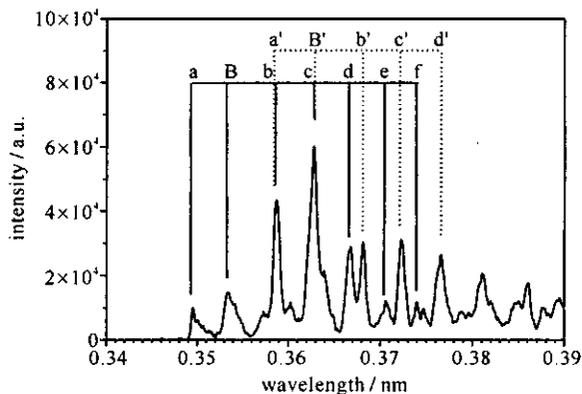


Fig. 3 Measured spectra of 5f-3d transitions emitted from laser-produced gold plasma by experiment
图 3 实验测量的金激光等离子体 5f-3d 跃迁辐射光谱

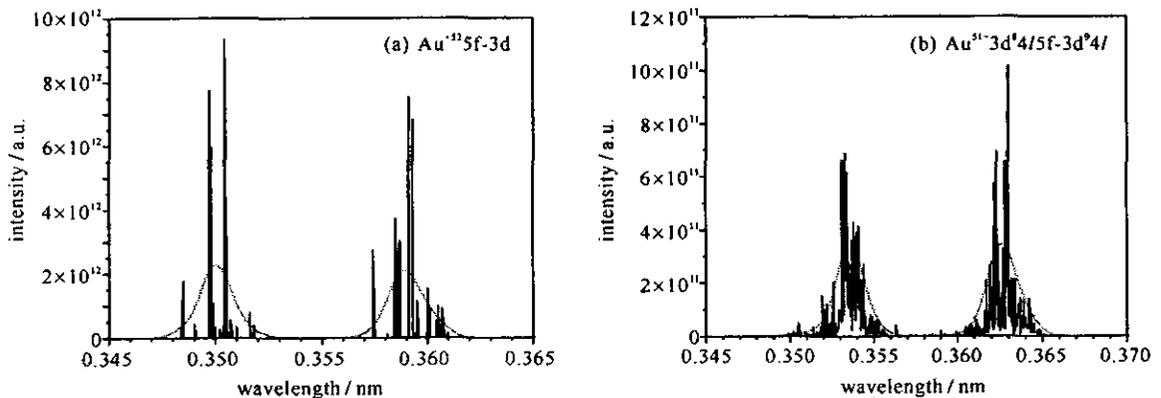
$5f_{5/2}-3d_{3/2}$ 与 $5f_{7/2}-3d_{5/2}$ 次跃迁组。其中,类 Co 离子的 $5f_{5/2}-3d_{3/2}$ 跃迁光谱峰在 0.35 nm 附近, $5f_{7/2}-3d_{5/2}$ 跃迁光谱峰在 0.359 nm 附近,与波长为 0.358 5 nm 的类 Ni 离子共振跃迁线 $5f_{5/2}-3d_{3/2}$ 融合为一光谱峰;对于类 Ni 离子,除了两条明显的共振线之外,还出现了类 Co 离子通过双电子复合到类 Ni 离子的伴线,其中 $3d^8 nl5f_{5/2}-3d^8 3d_{3/2} nl$ 伴线系位于 0.353 nm 附近, $3d^8 nl5f_{7/2}-3d^8 3d_{5/2} nl$ 伴线系位于 0.363 nm 附近,与类 Cu 离子的 $5f_{5/2}-3d_{3/2}$ 跃迁线系重合。在实验测量类 Ni 与类 Cu 离子的 $5f_{5/2}-3d_{3/2}$ 跃迁线系总强度时,必须在实验光谱峰中扣除来自于类 Co 与类 Ni 离子的 $5f_{7/2}-3d_{5/2}$ 跃迁线系的贡献。表 1 给出了实验光谱峰以及对应的跃迁组情况,其中跃迁组半高全宽度包含了类 Ni 离子 $3d-5f$ 共振线半高宽宽度 0.73 pm。

表 1 Au 激光等离子体 5f-3d 跃迁组的理论计算结果

Table 1 Theoretical calculation data of 5f-3d transition of laser-produced gold plasma

label	ion	transition	mean wavelength/0.1 nm	τ_{FWHM}/pm
a	Au ⁵²⁺	$3d^8 5f_{5/2}-3d^9$	3.500	
B	Au ⁵¹⁺	$3d^8 nl5f_{5/2}-3d^9 nl$	3.530	
b	Au ⁵¹⁺	$3d^9 5f_{5/2}-3d^{10}$	3.586	
a'	Au ⁵²⁺	$3d^8 5f_{7/2}-3d^9$	3.589	
B'	Au ⁵¹⁺	$3d^8 nl5f_{7/2}-3d^9 nl$	3.628	
c	Au ⁵⁰⁺	$3d^9 nl5f_{5/2}-3d^{10} nl$	3.625	1.0
d	Au ⁴⁹⁺	$3d^9 nln'l'5f_{5/2}-3d^{10} nln'l'$	3.663	1.4
b'	Au ⁵¹⁺	$3d^9 5f_{7/2}-3d^{10}$	3.683	
e	Au ⁴⁸⁺	$3d^9 nln'l'n''l''5f_{5/2}-3d^{10} nln'l'n''l''$	3.699	1.5
c'	Au ⁵⁰⁺	$3d^9 nl5f_{7/2}-3d^{10} nl$	3.721	1.1
f	Au ⁴⁷⁺	$3d^9 nln'l'n''l''l'''5f_{5/2}-3d^{10} nln'l'n''l''l'''$	3.737	1.7
d'	Au ⁴⁹⁺	$3d^9 nln'l'5f_{7/2}-3d^{10} nln'l'$	3.760	1.5

图 4 给出了类 Co 离子与类 Ni 离子的 5f-3d 跃迁系的光谱,其中的竖线表示单个的光谱线,其高度正比于辐射强度;图中虚线表示大量的单个谱线由于自然展宽以及仪器展宽而融合形成的光谱包络。从图中可以看出,类 Co 离子的 5f-3d 跃迁线系与类 Ni 离子的 $3d^8 4l5f-3d^9 4l$ 跃迁线系都劈裂成两个次跃迁线系。由于次跃迁线系上能级之间的能量差很小,可以认为是按统计分布的,因此两个次跃迁线系的总强度之比主要决定于等离子体的原子物理特性,而与等离子体温度密度状态无关,即这两个次跃迁线系的总强度比是固定的,知道了其中一个的强度,就可以推断另一个的强度。这种特性使我们很方便地扣除类 Ni 与类 Cu 光谱峰中的类 Co 与类 Ni 离子的光谱成分。

Fig. 4 Spectra of 5f-3d transitions emitted by Co-like gold ion (a), and spectra of $3d^8 4l5f-3d^9 4l$ transitions emitted by Ni-like gold ion (b)

(The upright lines represent the singular transition line, while the dashed curves represent the spectral profile of the transition arrays)

图 4 金元素类 Co 离子的 5f-3d 跃迁辐射谱(a)与类 Ni 离子的 $3d^8 4l5f-3d^9 4l$ 跃迁辐射谱(b)的理论计算结果

(图中细线表示光谱系跃迁线,其高度正比于跃迁强度,虚曲线表示在考虑了谱线展宽后的跃迁系形成的光谱轮廓)

5 结果与讨论

将实验光谱与电离度诊断模型结合并反向求解,可以得出等离子体电荷态分布数据。在测量实验光谱峰的强度时,由于光谱中存在光谱峰的部分重叠,并且还可能存在连续辐射本底,因此需要对实验光谱进行解谱处理。

此处,采用非线性最小二乘法扣除本底并剥离光谱峰,其中本底采用二项式函数拟和,光谱峰采用高斯函数拟和。实验中诊断得到的等离子体电荷态分布结果如图 5 所示,诊断中电子温度取为 $T_e=1.68$ keV,电子密度取为 10^{21} cm $^{-3}$,并且对离子丰度数据给出了 10% 的相对误差估计值。

从图 5 中可以看出,在考虑双电子复合和不考虑双电子复合的两种情况下,离子丰度最大的均为类 Cu 离子。两种情况下的平均电离度分别为 50.00 和 49.86,即考虑双电子复合的贡献之后,诊断得到的等离子体平均电离度仅有略微的增加。这表明,双电子复合对金冕区等离子体的平均电离度的较小影响,该影响主要体现在诊断结果中高离化度离子份额的增加。对于这种情况,可以这样来理解:当实验光谱给定时,每个实验光谱峰主要由通过电子离子碰撞激发布居的低离化度离子辐射成分与通过双电子复合过程布居的高离化度离子辐射成分两部分组成,如果只考虑电子碰撞激发的贡献,则每个光谱峰中高离化度离子的贡献被忽略,而低离化度离子的贡献被高估,因而根据实验光谱峰强度确定的低离化度离子的份额偏高,离子平均电离度偏低。显然,上述结果与双电子复合具有使等离子体电离度降低的趋势这一理论预计并不矛盾。电子温度对诊断的影响主要表现在双电子复合与电子离子碰撞激发两种原子物理过程对电子温度的不同依赖关系方面。理论计算表明,对于上述谱线辐射过程,当电子温度高于 200 eV 以后,双电子复合速率随等离子体电子温度升高而降低,而电子碰撞激发速率则随温度升高单调上升,两者的等速率点出现在 1.0 keV 附近,之后电子碰撞激发速率超过双电子复合速率。当温度达到 1.68 keV 时,电子碰撞激发速率达到双电子复合速率的 5 倍以上,并且温度越高,两者相差越大。对于电子密度的影响,由于电子密度与双电子复合速率和电子碰撞激发速率均为线性关系,因此其变化不影响电离度诊断结果。总体来说,当金等离子体冕区的电子温度在 1.5 keV 以上时,双电子复合对电离度诊断结果的影响比较小,而当温度高于 2.5 keV 时,这种影响基本上可以忽略。

与采用 Multi-1D 的数值模拟计算结果相比,通过 X 射线光谱学方法诊断得到的平均电离度约为 50,而数值模拟计算结果约为 73,两者存在明显差异。造成上述差异的可能因素如下:首先,它可能与 Multi-1D 程序所采用的离化平衡模型有关。为了说明这一点,我们分别求解了基于局域热动平衡以及碰撞-辐射平衡条件下的电离平衡方程,得到了给定温度密度条件下等离子体的离化态分布,结果如图 6 所示。从图 6 中可以看出,当电子温度 $T_e=1.68$ keV 时,基于局域热动平衡假设得到的等离子体电荷态分布及平均电离度 ($Z^*=73$) 与 Multi-1D 数值模拟计算结果 ($Z^*=73$) 相似,而基于非局域热动平衡条件 (non-LTE) 的碰撞-辐射模型得到的等离子体电荷态分布及平均电离度 (当 $T_e=1.68$ keV 时, $Z^*=44$; 当 $T_e=2.2$ keV 时, $Z^*=50$) 则与实验诊断结果相近。这表明,如果本文诊断结果是准确的,则说明金等离子体冕区实际上是非局域热动平衡的 (non-LTE)。其次,实验诊断的平均离化度是通过时间积分测量的实验光谱诊断得到的,因此实际上是时间平均结果,而数值模拟结果是针对特定时刻和特定状态的,两者存在一定的差异也是可能的。最后,上述差异也可能与实际激光打靶过程中存在横向电子热传导等多维效应有关,由于横向电子热传导造成实际打靶过程中冕区温度与电离度比 1 维数值模拟的结果要低。

与采用 Multi-1D 的数值模拟计算结果相比,通过 X 射线光谱学方法诊断得到的平均电离度约为 50,而数值模拟计算结果约为 73,两者存在明显差异。造成上述差异的可能因素如下:首先,它可能与 Multi-1D 程序所采用的离化平衡模型有关。为了说明这一点,我们分别求解了基于局域热动平衡以及碰撞-辐射平衡条件下的电离平衡方程,得到了给定温度密度条件下等离子体的离化态分布,结果如图 6 所示。从图 6 中可以看出,当电子温度 $T_e=1.68$ keV 时,基于局域热动平衡假设得到的等离子体电荷态分布及平均电离度 ($Z^*=73$) 与 Multi-1D 数值模拟计算结果 ($Z^*=73$) 相似,而基于非局域热动平衡条件 (non-LTE) 的碰撞-辐射模型得到的等离子体电荷态分布及平均电离度 (当 $T_e=1.68$ keV 时, $Z^*=44$; 当 $T_e=2.2$ keV 时, $Z^*=50$) 则与实验诊断结果相近。这表明,如果本文诊断结果是准确的,则说明金等离子体冕区实际上是非局域热动平衡的 (non-LTE)。其次,实验诊断的平均离化度是通过时间积分测量的实验光谱诊断得到的,因此实际上是时间平均结果,而数值模拟结果是针对特定时刻和特定状态的,两者存在一定的差异也是可能的。最后,上述差异也可能与实际激光打靶过程中存在横向电子热传导等多维效应有关,由于横向电子热传导造成实际打靶过程中冕区温度与电离度比 1 维数值模拟的结果要低。

6 结 论

利用实验测量的空间分辨金 M 带 5f-3d 跃迁系发射光谱,对金激光等离子体冕区的电荷态分布以及平均电离度进行了实验诊断。将实验诊断得到的平均电离度与 Multi-1D 辐射流体力学数值模拟以及基于 LTE 和 CRE 近似的离化平衡动力学计算进行了比较,结果表明基于 CRE 近似的离化平衡动力学计算结果与本文实验诊断结果更为接近。研究还表明,当电子温度高于 1.5 keV 时,双电子复合过程对 5f-3d 辐射跃迁的贡献比电子直接碰撞激发小得多,考虑双电子复合过程与否对电离度诊断的影响较小。最后,根据本文提出的诊断模型,电子密度对电离度诊断的影响可以忽略。

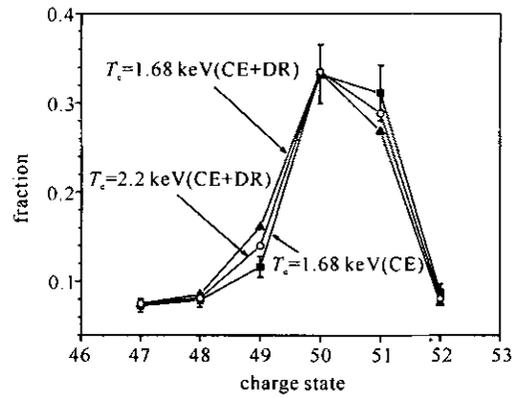


Fig. 5 Experimentally diagnosed distributions of charge states of laser-produced gold plasma

图 5 金激光等离子体的电荷态分布实验诊断结果

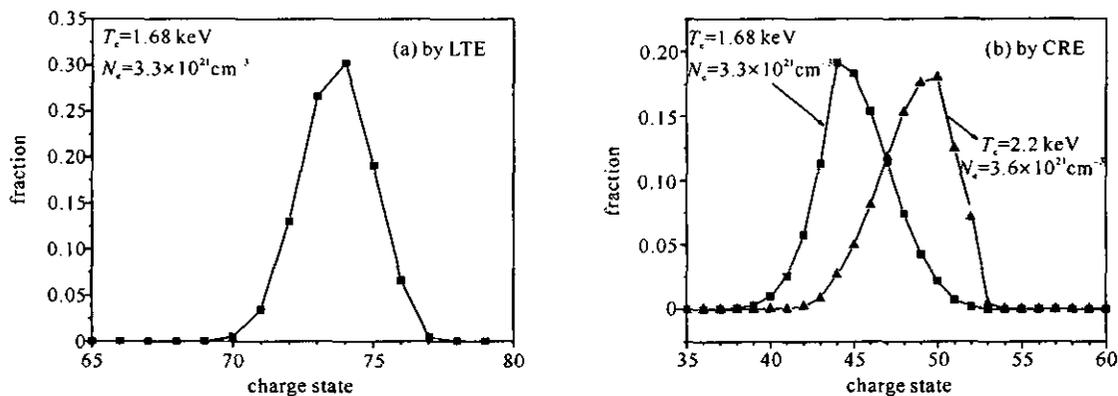


Fig. 6 Theoretical calculations of the distribution of charge state of laser-produced gold plasma

图 6 金激光等离子体电荷态分布理论计算结果

参考文献:

- [1] Foord M E, Glenzer S H, Thoe R S, et al. Accurate determination of the charge state distribution in a well characterized highly ionized Au plasma[J]. *J Quant Spectr and Rad Transf*, 2000, **65**:231-241.
- [2] Glenzer S H, Fournier K B, Wilson B G, et al. Ionization balance in inertial confinement fusion hohlraums[J]. *Phys Rev Lett*, 2001, **87** (4):045002.
- [3] Bauche-Arnoult C, Bauche J, Klapisch M. Variance of distributions of energy levels and of the transition arrays in atomic spectra. III. Case of spin-orbit-split arrays[J]. *Phys Rev A*, 1985, **31**(4):2248-2259.
- [4] Rozsnyal B F. Collisional-radiative average-atom model for hot plasmas[J]. *Phys Rev E*, 1997, **55**(6):7507-7521.
- [5] Bar-Shalom A, Oreg J, Klapisch M. Collisional radiative model for heavy atoms in hot non-local-thermodynamical-equilibrium plasmas[J]. *Phys Rev E*, 1997, **56**(1):70-73.
- [6] Bar-Shalom A, Oreg J, Goldstein W H, et al. Super-transition-arrays; A model for the spectral analysis of hot, dense plasma[J]. *Phys Rev A*, 1989, **40**(6):3183-3193.
- [7] Peyrusse O. Atomic configuration averages and non-local thermodynamical equilibrium plasma spectroscopy calculations[J]. *J Phys B: At Mol Phys*, 1999, **32**:683-700.
- [8] 张继彦, 杨国洪, 郑志坚, 等. 金激光等离子体的空间分辨 X 射线发射谱及其应用[J]. *强激光与粒子束*, 2003, **15**(10):981-984. (Zhang J Y, Yang G H, Zheng Z J, et al. Space-resolved X-ray spectrum emitted from laser-produced gold plasma and its applications. *High Power Laser and Particle Beam*, 2003, **15**(10):981-984)

Ionization balance in corona of laser-produced gold plasma

ZHANG Ji-yan, ZHENG Zhi-jian, YANG Guo-hong, YANG Jia-min, WANG Yan,
WEI Min-xi, HU Guang-yue, ZHANG Wen-hai, DING Yao-nan
(Research Center of Laser Fusion, CAEP, P.O. Box 919-986, Mianyang 621900, China)

Abstract: In this paper, a diagnostic method of average ionization degree by X-ray emission spectra of laser-produced gold plasma was presented. The coupled equations between the total intensities of 5f-3d transition arrays of gold M-band and the ion populations were set up based on steady collision-radiative equilibrium approximation, with electron-ion collisional excitation and dielectronic recombination being considered in the populations of exciting states. By the experimentally measured intensities of the 5f-3d transition arrays of gold ions, we deduced the distribution of charge states and average ionization degree of laser-produced gold plasma. Furthermore, we discussed the effects of electron temperature, electron density and dielectronic recombination on the diagnostics, and compared the diagnosed results with those of radiative-hydrodynamic simulations and ionization balance kinetics.

Key words: Inertial confinement fusion; Laser-produced plasma; Ionization degree; X-ray spectrum