

文章编号: 0253-2239(2005)12-1585-5

# 激光金等离子体中 $\text{Au}^{47+}$ 、 $\text{Au}^{53+}$ 的离子结构 和光谱分析\*

程 科<sup>1</sup> 朱志艳<sup>2</sup> 朱正和<sup>1\*\*</sup> 蒋 刚<sup>1</sup> 唐永建<sup>2</sup> 傅依备<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 四川大学原子与分子物理研究所, 成都 610065)  
(<sup>2</sup> 中国工程物理研究院, 绵阳 621900)

**摘要:** 根据扩展的相对论多组态狄拉克-福克(Dirac-Fock)理论,采用“多功能相对论原子结构程序(GRASP<sup>2</sup>)”,考虑量子电动力学(QED)效应和布雷特(Breit)修正,选用二参量费米有限核电荷分布和扩展平均能级模型,并考虑组态间的相互作用和电偶极跃迁,计算了类锆  $\text{Au}^{47+}$ 、类铁  $\text{Au}^{53+}$  的跃迁波长,跃迁几率和振子强度,计算的波长与实验值符合较好。研究表明,在类锆  $\text{Au}^{47+}$ 、类铁  $\text{Au}^{53+}$  的跃迁中,  $3d-4f$  是一条较强的跃迁通道。计算所得的波长值对金等离子体的能级寿命、电荷态分布和平均电离度研究有一定的参考价值。

**关键词:** 等离子体物理; 跃迁波长; 跃迁几率; 振子强度; 类锆  $\text{Au}^{47+}$ ; 类铁  $\text{Au}^{53+}$

中图分类号: O539; O413.1 文献标识码: A

## Ionic Structure and Spectrum Analysis of $\text{Au}^{47+}$ and $\text{Au}^{53+}$ in Au Laser Plasma

Cheng Ke<sup>1</sup> Zhu Zhiyan<sup>2</sup> Zhu Zhenghe<sup>1</sup> Jiang Gang<sup>1</sup> Tang Yongjian<sup>2</sup> Fu Yibei<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Institute of Atomic and Molecular Physics, Sichuan University, Chengdu 610065)  
(<sup>2</sup> The Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900)

**Abstract:** Based on the extended relativistic multi-configuration Dirac-Fock theory, with quantum electrodynamical (QED) effect and Breit correction, transition wavelengths, transition probabilities and oscillator strengths of  $\text{Au}^{47+}$  and  $\text{Au}^{53+}$  have been calculated with the General-purpose Relativistic Atomic Structure Program (GRASP<sup>2</sup>). Fermi nuclear model of two parameters, extended-average-level model, configuration interaction and electric dipole transition have been considered in the program. The wavelengths obtained are in good agreement with the experimental data available. It is found that the transition of  $3d-4f$  is the stronger transition channel. These data provide reference valuable for level lifetime, charge state distribution and average ionization degree of Au plasma.

**Key words:** plasma physics; transition wavelength; transition probability; oscillator strength; Ge-like  $\text{Au}^{47+}$ ; Fe-like  $\text{Au}^{53+}$

## 1 引 言

高离化重元素在惯性约束聚变、磁约束聚变、X射线激光、原子光谱学和等离子体诊断等方面有着重要意义,高原子序数( $Z$ )高剥离态离子的发射谱是当今研究热点之一。这些发射谱中包含着等离子体状态参量(如各种离子的能级寿命、谱线波长、电荷态分

布、平均离化度等等)和等离子体中物理过程的丰富信息,从而可用作等离子体状态诊断的有力工具<sup>[1,2]</sup>。然而,对于高 $Z$ 高剥离态的原子离子,由于其内部物理过程比中 $Z$ 、低 $Z$ 的原子离子要复杂的多,因此必然对其内部的状态诊断<sup>[3~5]</sup>提出了挑战。因此对于高 $Z$ 高剥离态的原子离子的理论研究就很有必要。

\* 中国工程物理研究院基金(51480020305SC0101)资助课题。

作者简介:程 科(1979~),男,湖北监利人,硕士,主要从事原子分子的结构与光谱分析。E-mail: chengkeandy@sina.com

\*\* 通信联系人。E-mail: zhuxm@scu.edu.cn

收稿日期: 2004-12-08; 收到修改稿日期: 2005-04-17

由于国内惯性约束聚变(ICF)实验室在一定温度和密度产生的金等离子体主要为类镉金  $Au^{47+}$  ~ 类铁金  $Au^{53+}$ , 朱志艳<sup>[2,6-9]</sup>较系统的研究了激光金等离子体中  $Au^{48+}$  ~  $Au^{52+}$  发射光谱和能级寿命的相对论多组态计算。然而,对  $Au^{47+}$ 、 $Au^{53+}$  的跃迁波长,跃迁几率和振子强度等参量的研究,国内外均未见任何实验结果和理论研究的报道。仅 Seely 等<sup>[10]</sup>采用相对论多组态狄拉克-福克(Dirac-Fock, MCDF)方法计算了类铁  $Au^{53+}$  离子的  $3d^8 3F_4 - 3p^5 3d^9 3D_3$  的跃迁波长,且文献<sup>[10]</sup>中的计算值有待进一步改进。

本文根据扩展的相对论多组态狄拉克-福克方法,使用“多功能相对论原子结构程序(GRASP<sup>2</sup>)”,考虑布雷特修正和量子电动力学(QED)效应,选用费米有限核模型和平均扩展能级模式,计算了类镉  $Au^{47+}$ 、类铁  $Au^{53+}$  的跃迁波长、跃迁几率和振子强度。发现计算的波长值比文献<sup>[10]</sup>中的要好,并与实验值能较好的符合。计算所得的结果可为金等离子体中的能级寿命、电荷态分布和平均离化度的研究提供一定的参考价值。

## 2 理论方法<sup>[2,11]</sup>

在相对论狄拉克-福克多组态理论中, $N$  电子原子或离子体系的哈密顿量为

$$\hat{H} = \sum_{i=1}^N \hat{H}_i + \sum_{i<j}^N |\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|^{-1}, \quad (1)$$

$\hat{H}_i$  是第  $i$  个电子的狄拉克-库仑哈密顿量

$$\hat{H}_i = c\boldsymbol{\alpha} \cdot \hat{\mathbf{p}} + (\beta - 1)c^2 + V_{\text{nuc}}(\hat{\mathbf{r}}), \quad (2)$$

其中  $V_{\text{nuc}}(r)$  是核场势, $\boldsymbol{\alpha}$  和  $\beta$  分别是狄拉克矢量和标量矩阵, $\hat{\mathbf{p}}$  是相对论宇称算符, $c$  是真空中光速。

单电子的狄拉克轨道  $|nkm\rangle$  在坐标表象中表示为

$$\langle r | nkm \rangle = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} P_{nk}(r) & \chi_{km}(\mathbf{r}/r) \\ iQ_{nk}(r) & \chi_{-km}(\mathbf{r}/r) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中  $P_{nk}(r)$  和  $Q_{nk}(r)$  分别为径向波函数的大小分量, $\chi_{km}(\mathbf{r}/r)$  为旋子球谐函数。

$N$  电子体系的组态状态波函数  $|\gamma PJM\rangle$  是上述单电子狄拉克轨道组成的  $N$  阶斯莱特(Slater)行列式的线性组合。由于组态相互作用,原子态波函数  $|\Gamma PJM\rangle$  是  $P$ 、 $J$ 、 $M$  相同的组态波函数  $|\gamma PJM\rangle$  的线性叠加

$$|\Gamma PJM\rangle = \sum_{r=1}^{n_c} C_r |\gamma_r PJM\rangle,$$

式中  $C_r$  为组态混合系数, $n_c$  是组态状态函数的数目,即其集合  $|\gamma PJM\rangle$  的大小, $P$ 、 $J$  和  $M$  分别表示原

子的电子态的宇称、总角动量子数和总磁量子数。

径向波函数  $P_{nk}(r)$ 、 $Q_{nk}(r)$  可以用自洽场方法从径向狄拉克方程解出,再以布雷特和量子电动力学修正作为微扰,即可得波函数和能量的高阶近似值。

单位时间( $\hbar^3/me^4$ )从  $\beta - \alpha$  的自发跃迁几率定义为

$$A_{\beta-\alpha} = [j_\beta]^{-1} \sum_{m_\alpha, m_\beta} 2\pi |M_{q\beta}|^2, \quad (4)$$

其中跃迁矩阵元的径向积分  $M_{q\beta}$  为

$$M_{q\beta} = \left(\frac{\omega}{c\pi}\right)^{1/2} (-1)^{j_\alpha - m_\alpha} \begin{bmatrix} j_\alpha & L & j_\beta \\ -m_\alpha & M & m_\beta \end{bmatrix} \times [j_\alpha, j_\beta]^{1/2} \begin{bmatrix} j_\alpha & L & j_\beta \\ 1/2 & 0 & -1/2 \end{bmatrix} \bar{M}_{q\beta}, \quad (5)$$

由  $3-j$  符号的性质有

$$A_{\beta-\alpha} = 2\alpha\omega \frac{[j_\alpha]}{[L]} \begin{bmatrix} j_\alpha & L & j_\beta \\ 1/2 & 0 & -1/2 \end{bmatrix} |\bar{M}_{q\beta}|^2, \quad (6)$$

$j_\alpha$ 、 $j_\beta$  分别为上、下能态角动量, $\omega$  为能级间隔, $|M_{q\beta}|$  为径向积分。

振子强度定义为

$$f_{\beta\rightarrow\alpha} = \frac{[j_\beta]}{[j_\alpha]} \frac{A_{\beta\rightarrow\alpha}}{2\alpha\omega^2}, \quad (7)$$

其中  $\alpha = 4\pi^2 e^2 / (mc)$ 。

## 3 计算结果

本文采用全相对论多组态狄拉克-福克理论的程序 GRASP<sup>2</sup>,选用二参量费米有限核电荷分布和扩展平均能级模型(EAL)进行计算,根据组态间产生相互作用的条件:

- 1) 组态宇称相同;
- 2) 不同组态之间,最多只能有两个电子的轨道量子数不同;
- 3) 不同组态间必须有相同的  $J$  值;
- 4) 两个组态函数间的能级间隔越大,其组态相互作用越小。

采用该程序计算的类镉  $Au^{48+}$  ~ 类钴  $Au^{52+}$  离子光谱的跃迁波长<sup>[2,6-9]</sup>与实验值符合较好,参考了这些的组态的选取,对于类镉  $Au^{47+}$ ,分别选取奇宇称组态为  $3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^4 d$ ,  $3p^6 3d^9 4s^2 4p^2 4f$ ,  $3p^5 3d^{10} 4s^2 4p^2 4d$ ;偶宇称组态为  $3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^2$ ,对于类铁  $Au^{53+}$ ,分别选取奇宇称组态为  $3p^6 3d^7 4p$ ,  $3p^6 3d^7 4f$ ,  $3p^5 3d^9$ ,  $3p^5 3d^8 4s$ ;偶宇称组态为  $3p^6 3d^8$ ,将这些组态一并输入程序计算了  $Au^{47+}$ ,  $Au^{53+}$  的光谱跃迁波长、跃迁几率和振子强度。计算

表明电四,磁偶,磁四跃迁几率和电偶跃迁几率相比,它们对离子的能级寿命几乎无影响.因此本文的计算只考虑电偶极跃迁,即只有宇称相反的态之间才可能发生跃迁.计算结果分别见表 1 和表 2(限于

篇幅,本文只列出了跃迁几率  $A \geq 10^{12} \text{ s}^{-1}$  的跃迁).表 1 和表 2 中的相对论电子状态为  $^{2S+1}L_J$ , 其中  $J$  为相对论的电子总角动量.

表 1 类镉金  $\text{Au}^{47+}$  的跃迁波长  $\lambda$ , 跃迁几率  $A$  和振子强度  $g_f$  (库仑规范)

Table 1 Transition wavelengths  $\lambda$ , transition probabilities  $A$  and oscillator strengths  $g_f$  of Ge-like  $\text{Au}^{47+}$  (Coulomb gauge)

Transition	$\lambda / \text{nm}$	$A / \text{s}^{-1}$	$g_f$	Transition	$\lambda / \text{nm}$	$A / \text{s}^{-1}$	$g_f$
$4p^2 \ ^3P_0 - 4p^4 4d^3 D_1$	3.8637	1.5042(12)	1.0099	$4p^2 \ ^3P_1 - 3p^5 4p^2 4d^3 D_2$	4.4999(-1)	6.0101(13)	9.1225(-1)
$4p^2 \ ^3P_0 - 3d^9 4p^2 4f^3 D_1$	5.0623(-1)	1.9651(14)	2.2649	$4p^2 \ ^3P_1 - 3p^5 4p^2 4d^3 P_0$	4.4971(-1)	8.6701(13)	2.6287(-1)
$4p^2 \ ^3P_0 - 3d^9 4p^2 4f^3 P_1$	4.8901(-1)	4.9161(14)	5.2873	$4p^2 \ ^3P_1 - 3p^5 4p^2 4d^3 P_1$	4.4961(-1)	2.0314(13)	1.8469(-1)
$4p^2 \ ^3P_0 - 3d^9 4p^2 4f^3 D_1$	4.8729(-1)	6.0359(12)	6.4460(-2)	$4p^2 \ ^3P_1 - 3p^5 4p^2 4d^1 P_1$	4.4802(-1)	2.7181(13)	2.4538(-1)
$4p^2 \ ^3P_0 - 3d^9 4p^2 4f^3 I_5$	4.8632(-1)	1.1757(12)	1.2506(-2)	$4p^2 \ ^3P_1 - 3p^5 4p^2 4d^5 F_1$	3.9444(-1)	5.0200(13)	3.5128(-1)
$4p^2 \ ^3P_0 - 3d^9 4p^2 4f^1 D_2$	4.5685(-1)	7.7665(12)	7.2905(-2)	$4p^2 \ ^3P_1 - 3p^5 4p^2 4d^5 F_2$	3.9415(-1)	3.1775(13)	3.7003(-1)
$4p^2 \ ^3P_0 - 3p^5 4p^2 4d^1 P_1$	4.5022(-1)	1.2276(14)	1.1192	$4p^2 \ ^3P_1 - 3p^5 4p^2 4d^5 D_0$	3.9414(-1)	5.5145(13)	1.2843(-1)
$4p^2 \ ^3P_0 - 3p^5 4p^2 4d^3 D_1$	3.9422(-1)	5.6464(13)	3.9465(-1)	$4p^2 \ ^3P_1 - 3p^5 4p^2 4d^3 F_2$	3.9249(-1)	1.9340(13)	2.2333(-1)
$4p^2 \ ^3P_1 - 4p 4d^3 P_0$	3.8687	1.1297(12)	2.5349(-1)	$4p^2 \ ^1D_2 - 3d^9 4p^2 4f^3 F_2$	5.0600(-1)	1.9506(14)	3.7437
$4p^2 \ ^3P_1 - 3d^9 4p^2 4f^5 P_1$	5.0597(-1)	1.8368(14)	2.1148	$4p^2 \ ^1D_2 - 3d^9 4p^2 4f^3 G_3$	5.0576(-1)	1.9446(14)	5.2199
$4p^2 \ ^3P_1 - 3d^9 4p^2 4f^3 D_2$	5.0573(-1)	1.8925(14)	3.6283	$4p^2 \ ^1D_2 - 3d^9 4p^2 4f^3 D_1$	5.0548(-1)	1.9205(14)	2.2069
$4p^2 \ ^3P_1 - 3d^9 4p^2 4f^5 D_0$	5.0528(-1)	1.8991(14)	7.2688(-1)	$4p^2 \ ^1D_2 - 3d^9 4p^2 4f^3 D_2$	4.8942(-1)	1.0278(14)	1.8454
$4p^2 \ ^3P_1 - 3d^9 4p^2 4f^3 D_1$	5.0440(-1)	6.9573(12)	7.9610(-2)	$4p^2 \ ^1D_2 - 3d^9 4p^2 4f^1 F_3$	4.8847(-1)	4.7718(14)	1.1948(1)
$4p^2 \ ^3P_1 - 3d^9 4p^2 4f^5 G_2$	4.9284(-1)	2.0326(12)	3.7008(-2)	$4p^2 \ ^1D_2 - 3d^9 4p^2 4f^1 D_2$	4.8839(-1)	3.7773(14)	6.7537
$4p^2 \ ^3P_1 - 3d^9 4p^2 4f^5 S_2$	4.9269(-1)	6.7427(12)	1.2269(-1)	$4p^2 \ ^1D_2 - 3d^9 4p^2 4f^1 P_1$	4.8807(-1)	4.8684(14)	5.2159
$4p^2 \ ^3P_1 - 3d^9 4p^2 4f^3 F_2$	4.8918(-1)	9.0017(13)	9.6880(-1)	$4p^2 \ ^3P_2 - 3d^9 4p^2 4f^3 D_3$	5.0551(-1)	1.9311(14)	5.1786
$4p^2 \ ^3P_1 - 3d^9 4p^2 4f^3 P_1$	4.8954(-1)	1.0091(13)	1.8127(-1)	$4p^2 \ ^3P_2 - 3d^9 4p^2 4f^5 P_1$	5.0533(-1)	1.8660(14)	2.1431
$4p^2 \ ^3P_1 - 3d^9 4p^2 4f^3 S_1$	4.8870(-1)	4.0655(14)	4.3670	$4p^2 \ ^3P_2 - 3d^9 4p^2 4f^3 F_2$	5.0527(-1)	1.8808(14)	3.5992
$4p^2 \ ^3P_1 - 3d^9 4p^2 4f^3 P_0$	4.8843(-1)	5.0206(14)	1.7957	$4p^2 \ ^3P_2 - 3d^9 4p^2 4f^1 P_1$	4.8817(-1)	4.7635(14)	5.1055
$4p^2 \ ^3P_1 - 3d^9 4p^2 4f^3 D_2$	4.8841(-1)	3.5937(14)	6.4258	$4p^2 \ ^3P_2 - 3d^9 4p^2 4f^3 P_2$	4.8789(-1)	4.6541(14)	8.3043
$4p^2 \ ^3P_1 - 3d^9 4p^2 4f^1 D_2$	4.8739(-1)	1.0058(14)	1.7909	$4p^2 \ ^3P_2 - 3d^9 4p^2 4f^3 D_3$	4.8787(-1)	4.6539(14)	1.1625(1)
$4p^2 \ ^3P_1 - 3p^5 4p^2 4d^3 P_2$	4.5127(-1)	4.6950(13)	7.1671(-1)	$4p^2 \ ^3P_2 - 3d^9 4p^2 4d^3 D_3$	4.5059(-1)	1.1793(14)	2.5127
$4p^2 \ ^3P_1 - 3p^5 4p^2 4d^3 S_1$	4.5035(-1)	6.5788(13)	6.0009(-1)	$4p^2 \ ^1S_0 - 3d^9 4p^2 4f^1 P_1$	4.8784(-1)	4.6443(14)	4.9711

注:表中(n)表示 $\times 10^n$ .

表 2 类铁金  $\text{Au}^{53+}$  的跃迁波长  $\lambda$ , 跃迁几率  $A$  和振子强度  $g_f$  (库仑规范)

Table 2 Transition wavelengths, transition probabilities  $A$  and oscillator strengths of Fe-like  $\text{Au}^{53+}$  (Coulomb gauge)

Transition		Wavelength / nm			Transition probability / $\text{s}^{-1}$	Oscillator strength
Nonrelativistic electronic configuration	Relativistic electronic state	$\lambda_{\text{exp.}}^{[10]}$	$\lambda_{\text{ref.}}^{[10]}$	$\lambda_{\text{cal.}}$		
$3d^8 - 3p^5 3d^9$	$^3F_4 - ^3D_3$	2.4200	2.3996	2.4005	1.7533(12)	1.0603
$3d^8 - 3d^7 4p$	$^3F_4 - ^5F_3$			0.57482	1.7800(12)	6.1720(-2)
	$^3F_4 - ^3I_6$			0.57006	1.1166(13)	5.9841(-1)
$3d^8 - 3p^5 3d^8 4s$	$^3F_4 - ^3G_5$			0.50962	2.5502(13)	1.0922
	$^3F_4 - ^3D_1$			0.47939	5.4322(13)	1.3101
	$^3F_4 - ^5D_4$			0.46284	3.8672(14)	3.7260

(续表)

Transition		Wavelength /nm			Transition	Oscillator
Nonrelativistic electronic configuration	Relativistic electronic state	$\lambda_{\text{exp.}}^{[10]}$	$\lambda_{\text{ref.}}^{[10]}$	$\lambda_{\text{cal.}}$	probability /s <sup>-1</sup>	strength
3d <sup>8</sup> -3d <sup>7</sup> 4f	<sup>3</sup> F <sub>4</sub> - <sup>3</sup> G <sub>5</sub>			0.47467	1.1840(14)	4.3992
	<sup>3</sup> F <sub>4</sub> - <sup>1</sup> D <sub>2</sub>			0.45907	4.7170(14)	1.6393(1)
	<sup>1</sup> D <sub>2</sub> - <sup>3</sup> F <sub>3</sub>			0.47575	1.7491(14)	4.1547
	<sup>1</sup> D <sub>2</sub> - <sup>3</sup> P <sub>1</sub>			0.45956	3.3479(14)	3.1801
	<sup>1</sup> D <sub>2</sub> - <sup>3</sup> H <sub>4</sub>			0.45941	1.3030(14)	2.8861
	<sup>1</sup> D <sub>2</sub> - <sup>3</sup> D <sub>3</sub>			0.45930	2.4713(14)	5.4712
	<sup>1</sup> S <sub>0</sub> - <sup>3</sup> D <sub>1</sub>			0.47801	1.6460(14)	1.6915
	<sup>1</sup> S <sub>0</sub> - <sup>1</sup> P <sub>1</sub>			0.45912	4.3365(14)	4.1112
	<sup>3</sup> F <sub>3</sub> - <sup>3</sup> G <sub>4</sub>			0.47421	1.0757(14)	3.2639
	<sup>3</sup> F <sub>3</sub> - <sup>1</sup> F <sub>3</sub>			0.46180	1.1158(14)	1.7837
	<sup>3</sup> F <sub>3</sub> - <sup>3</sup> D <sub>2</sub>			0.45961	1.3370(14)	2.1171
	<sup>3</sup> P <sub>2</sub> - <sup>1</sup> H <sub>5</sub>			0.47447	1.8367(14)	4.3390
	<sup>3</sup> P <sub>2</sub> - <sup>3</sup> D <sub>1</sub>			0.46089	3.3276(14)	3.1790
	<sup>3</sup> P <sub>1</sub> - <sup>3</sup> H <sub>4</sub>			0.47624	1.0195(14)	2.4265
	<sup>3</sup> P <sub>1</sub> - <sup>1</sup> F <sub>3</sub>			0.47546	1.4612(14)	5.4471
	<sup>3</sup> F <sub>2</sub> - <sup>3</sup> G <sub>3</sub>			0.47428	2.0740(14)	4.8959
<sup>3</sup> F <sub>2</sub> - <sup>3</sup> P <sub>2</sub>			0.47361	1.4078(14)	2.3670	
<sup>3</sup> P <sub>0</sub> - <sup>3</sup> D <sub>1</sub>			0.47380	2.4962(14)	2.5203	

注:表中(n)表示×10<sup>n</sup>。

## 4 讨 论

对跃迁几率和振子强度的计算表明,在类锆 Au<sup>47+</sup>和类铁 Au<sup>53+</sup>离子体系中,3d-4f之间的跃迁是较强的跃迁通道,这条跃迁通道在类镓 Au<sup>48+</sup>~类钴 Au<sup>52+</sup>的计算中<sup>[2,6~9,12]</sup>也得到了证实。跃迁波长、跃迁几率与能级寿命有着密切的关系,能级寿命决定于跃迁几率,而影响跃迁几率的因素比较多,因为自发跃迁几率为

$$A = \frac{16\pi^4 e^2 a_0^2 \sigma^3}{3h} S \sum \begin{bmatrix} J & 1 & J' \\ M & q & M' \end{bmatrix},$$

式中的偶极线强 S 为上下态的约化矩阵元绝对值的平方

$$S = |\langle \gamma J \| p(1) \| \gamma' J' \rangle|^2,$$

约化矩阵决定于态和算符,3-j 符号决定于空间因素。上下能级差  $\sigma(\text{cm}^{-1})$  越大,一般来讲,上能级越高,则 A 越大,寿命越小。每个能级受上态的级联效应越大,则其寿命会增大。

由于现有检测水平很难测量到类锆金和类铁金的能级寿命,而离子的能级寿命对确定等离子体中各离子的粒子数分布,平均离化度及电荷态分布也是极其有效的一种途径。因此,本文计算的波长,跃迁几

率和振子强度对离子的能级寿命能提供一定的参考价值。目前,对于类锆 Au<sup>47+</sup>、类铁 Au<sup>53+</sup>的能级寿命和激光金等离子体内的平均电荷态分布的研究正在进行中。

## 参 考 文 献

- Xu Wei, Wan Baonian. Spectroscopic method for measurement of plasma ion temperature and rotation velocity[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(9): 1115~1118 (in Chinese)  
徐 伟,万宝年. 光谱法测量等离子体离子温度和旋转速度[J]. *光学学报*, 2003, **23**(9): 1115~1118
- Liu Bo, Zhu Zhiyan, Jiang Gang *et al.*. Level lifetimes of Au<sup>52+</sup> in Au plasma[J]. *Chin. J. Atomic and Molecular Physics*, 2003, **20**(1): 55~58 (in Chinese)  
刘 波,朱志艳,蒋 钢等. 激光金等离子体中 Au<sup>52+</sup>静态能级寿命的相对论多组态计算[J]. *原子与分子物理学报*, 2003, **20**(1): 55~58
- Yuan Xiao, Yu Wei, Chen Zhaoyang *et al.*. Relativistic self-guiding of ultrashort laser pulse radiation in low density plasmas[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(2): 161~164 (in Chinese)  
袁 孝,余 玮,陈朝阳等. 超强脉冲激光在低密度等离子体中的相对论自导引效应[J]. *光学学报*, 2002, **22**(2): 161~164
- Chen Qiang, Shen Baifei. Transparency of an overdense plasma layer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(1): 57~61 (in Chinese)  
陈 强,沈百飞. 稠密等离子体层的透明性[J]. *光学学报*, 2004, **24**(1): 57~61
- Shali Xiao, Yingjun Pan, Xianxin Zhong *et al.*. High-resolution X-ray focusing concave (elliptical) curved crystal spectrograph for laser-produced plasma[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(8): 495~496

- 6 Zhu Zhiyan, Zhu Zhenghe, Jiang Gang *et al.*. Level lifetimes and transitions of  $\text{Au}^{50+}$  in Au plasma [J]. *J. Sichuan University (Natural Science Edition)*, 2002, **39**(4): 709~715 (in Chinese)  
朱志艳,朱正和,蒋 钢等. 激光金等离子体中  $\text{Au}^{50+}$  的光谱跃迁和能级寿命的相对论多组态计算[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2002, **39**(4): 709~715
- 7 Zhu Zhiyan, Zhu Zhenghe, Jiang Gang *et al.*. Level lifetime of  $\text{Au}^{51+}$  in Au plasma[J]. *Chin. J. Atomic and Molecular Physics*, 2002, **19**(2): 138~142 (in Chinese)  
朱志艳,朱正和,蒋 钢等. 金等离子体中  $\text{Au}^{51+}$  能级寿命的相对论多组态计算[J]. 原子与分子物理学报, 2002, **19**(2): 138~142
- 8 Zhu Zhiyan, Zhu Zhenghe, Jiang Gang *et al.*. Calculation of relativistic multi-configuration level lifetime of  $\text{Au}^{49+}$  in Au laser plasma [J]. *Nuclear Fusion and Plasma Physics*, 2003, **23**(2): 101~107 (in Chinese)  
朱志艳,朱正和,蒋 钢等. 激光金等离子体中  $\text{Au}^{49+}$  能级寿命的相对论多组态计算[J]. 核聚变与等离子体物理, 2003, **23**(2): 101~107
- 9 Zhu Zhiyan. The first-principle method of the averaged charge state distribution in Au plasma and the potential energy function and molecular reaction dynamics of DTP [D]. Chengdu: Sichuan University, 2004. 51~54 (in Chinese)  
朱志艳. 金等离子体平均电荷分布的第一原理方法和 DTO 的势能函数与分子反应动力学[D]. 成都: 四川大学, 2004. 51~54
- 10 J. F. Seely, J. O. Ekberg, C. M. Brown *et al.*. Laser-produced spectra and QED effects for Fe-, Co-, Cu-, and Zn-like Ions of Au, Pb, Bi, Th, and U [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1986, **57**(23): 2924~2926
- 11 Yang Tianli, Tan Mingliang, Jiang Gang *et al.*. Studies on  $M_1$  transitions for Be-like ions related to X-ray[J]. *Chin. J. Laser*, 2002, **29**(1): 156~160 (in Chinese)  
杨天丽,谭明亮,蒋 钢等. 类铍离子的  $M_1$  跃迁的 X 射线激光光谱的理论研究[J]. 中国激光, 2002, **29**(1): 156~160
- 12 P. Mandelbaum, J. F. Seely, A. Bar-Shalom *et al.*. Effect of configuration mixing on  $3d-4f$  transitions in highly ionized Ga-, Zn-, and Cu-like ions[J]. *Phys. Rev. (A)*, 1991, **44**: 5744~5751