

文章编号: 0253-2239(2009)11-2968-05

# 激光金等离子体中 $Au^{48+}$ 离子的光谱分析和能级寿命

朱志艳<sup>1</sup> 朱正和<sup>2</sup> 张 莉<sup>2</sup> 蒋 刚<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 浙江理工大学物理系光电材料与器件中心, 浙江 杭州 310018; <sup>2</sup> 四川大学原子分子物理研究所, 四川 成都 610065)

**摘要** 根据扩展的全相对论多组态 Dirac-Fock 理论, 采用“多功能相对论原子结构程序 GRASP<sup>2</sup> (General-Purpose Relativistic Atomic Structure Program 2, 1992), 考虑量子电动力学 (QED) 效应和 Breit 修正, 结合惯性约束聚变 (ICF) 实验室等离子体中已经观察到的激光照射 Au 元素所产生的一些多重电荷态离子的外壳层共振线跃迁光谱, 选取重要的电子组态, 计算激光金等离子体中类镱  $Au^{48+}$  离子的光谱跃迁波长、能级寿命和能级宽度。计算所得波长值与实验值符合较好, 能级寿命与能级宽度的大小关系符合海森堡的能量与时间测不准原理。计算结果对金等离子体中的离子平均寿命、电荷态分布和平均电离度的研究具有一定的参考价值。

**关键词** 测量; 等离子体物理; 跃迁波长; 能级寿命; 能级宽度;  $Au^{48+}$

**中图分类号** O539; O413.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092911.2968

## Spectrum Analysis and Level Lifetimes of $Au^{48+}$ in Au Laser Plasma

Zhu Zhiyan<sup>1</sup> Zhu Zhenghe<sup>2</sup> Zhang Li<sup>2</sup> Jiang Gang<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Physics, Center for Optoelectronics Materials and Devices, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China  
<sup>2</sup> Institute of Atomic and Molecular Physics, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China

**Abstract** The results of inertia confinement fusion (ICF) experiment indicate that the spectra of laser Au plasma contains the transitions of  $3d \rightarrow 4p$ ,  $3d \rightarrow 4f$  and  $3p \rightarrow 5d$  of  $Au^{48+}$ . Based on the extended relativistic multi-configuration Dirac-Fock theory and the General-Purpose Relativistic Atomic Structure Program 2 (GRASP<sup>2</sup>) with quantum electrodynamical effect (QED) and Breit correction, the transition wavelengths, level lifetimes and level widths of  $Au^{48+}$  have been calculated. The transitions mentioned above have been considered in the calculation. The wavelengths obtained are in good agreement with the experimental data available. The relationship between the level lifetimes and the level widths satisfies with the Heisenberg uncertainty principle. The results provide reference valuable for average ionic lifetime, charge state distribution and average ionization degree of Au plasma.

**Key words** measurement; plasma physics; transition wavelength; level lifetime; level width;  $Au^{48+}$

## 1 引 言

近年来,对激光等离子体的研究引起了人们的广泛关注<sup>[1~3]</sup>。高 Z 高离化态等离子体产生的发射光谱中包含着等离子体状态参量和等离子体中物理过程的大量信息,从而成为等离子体诊断学研究中的一个重要部分。由于这种发射谱中,两个电子组态间多条跃迁谱线非常接近,再加上各种展宽效应[如斯塔克 (Stark) 展宽、多普勒 (Doppler) 展宽、等离子体的自吸收效应和碰撞展宽等]和仪器的有限

分辨本领,使得大量的谱线集中在一个较小的波长范围内,形成了不可分辨的带结构谱,所以高 Z 元素高剥离态离子发射谱研究一直是离子谱学研究中极具挑战性的课题。

粒子的能级寿命与能级粒子数分布有着密切的联系。研究离子的能级寿命和离子平均寿命对确定等离子体中离子的粒子数分布、平均离化度及电荷态分布也是极其有效的一种途径。然而用实验的方法测定粒子的能级寿命还存在很大困难。对于高 Z

收稿日期: 2008-12-08; 收到修改稿日期: 2009-01-19

基金项目: 国家 863 计划(863-804-3-4.4.9)和浙江理工大学科研启动基金(0613059-Y)资助课题。

作者简介: 朱志艳(1977—),女,博士,副教授,主要从事原子分子物理方面的研究。E-mail: peonyzhu@sina.com

高剥离态的原子离子, 由于其内部物理过程的复杂性与多样性, 测量其能级寿命更是面临着特殊的、不同于中低  $Z$  原子离子能级寿命测量的严峻挑战。

高  $Z$  高剥离态的镓等电子序列离子是激光等离子体中的主要离子态之一, 对其光谱和能级结构的理论研究已有相关报道<sup>[4,5]</sup>。激光辐照金靶产生的发射谱的实验研究表明, 类镓 Au<sup>48+</sup> 离子的  $M$  壳层跃迁谱线占有重要比例。迄今为止, 国内外学者发表了一些有关类镓金, 即 Au<sup>48+</sup> 离子光谱的跃迁波长、跃迁几率和振子强度等参量的研究成果<sup>[6~12]</sup>。这些研究得到了一些有用的光谱参数, 而对 Au<sup>48+</sup> 离子的能级寿命和离子平均寿命的研究至今仍是空白。因此, 理论计算就显得尤为必要。

由于高离化态原子中电子的运动速度很快, 核电场很强, 必须考虑相对论效应和量子电动力学效应。本文采用扩展的相对论多组态狄拉克-福克(Dirac-Fock)方法, 使用多功能相对论原子结构程序(GRASP<sup>2</sup>), 选用二参数费米(Fermi)有限核电荷分布和扩展平均能级模型(EAL)进行计算。根据宇称、能量和角动量等判据, 选取包含实验中观察到的金等离子体 X 光谱的几类跃迁的重要组态, 考虑组态相互作用, 分别选取奇宇称组态  $3d^{10}4s^24p$ ; 偶宇称组态  $3d^94s^24p^2$ ,  $3p^53d^{10}4s^24p5d$  和  $3d^94s^24p4f$ , 将这些组态一并输入程序, 并以 Breit 修正、自能修正和真空极化修正(QED)为微扰, 得到波函数和能级的高阶近似, 计算 Au<sup>48+</sup> 的跃迁波长、能级寿命和能级宽度。能级寿命为该能级到所有低能级跃迁几率之和的倒数。尝试计算的结果表明电四极、磁偶极、磁四极跃迁几率和电偶极跃迁几率相比, 它们对离子的能级寿命几乎无影响。因此本文计算只考虑电偶极跃迁。能级寿命计算结果的准确性与组态的选取密切相关。根据实验光谱选取组态计算所得到的跃迁波长与实验值符合得较好, 这说明计算中所选组态比较合理与完备。因此可以相信本文所计算的能级寿命具有一定的参考价值, 可用来计算 Au<sup>48+</sup> 的离子寿命, 并进一步为 Au 等离子体诊断提供一定的

依据。

## 2 理论方法

在相对论 Dirac-Fock 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 Dirac-Coulomb 哈密顿量

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

其中  $V_{\text{nuc}}(\mathbf{r})$  是核势场,  $\boldsymbol{\alpha}$  和  $\beta$  分别是 Dirac 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 Dirac 轨道  $|nkm\rangle$  在坐标表象中表示为

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

式中  $P_{nk}(r)$  和  $Q_{nk}(r)$  分别为径向波函数的大小分量,  $\chi_{kn}(r/r)$  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 Dirac 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  $|\gamma PJM\rangle$  的线性迭加。

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

式中  $C_{r\Gamma}$  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 Dirac 方程解出, 再以 Breit 和 QED 修正作为微扰, 即可得波函数和能量的高阶近似值。

能级寿命为自发发射几率的倒数。单位时间 ( $\hbar^3/me^4$ ) 从  $\beta \sim \alpha$  的自发跃迁几率定义为

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

其中跃迁矩阵元的径向积分  $M_{\alpha\beta}$  为

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

由  $3-j$  符号的性质有

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

式中  $\bar{M}_{\alpha\beta}$  的确定见文献[13]。

如果考虑一个原子系综,  $t = 0$  时, 单位体积有  $N_\beta(0)$  个原子被激发到能级  $\beta$ , 这些原子一般将辐射衰落到若干低能级  $\alpha$ 。当不存在像由碰撞引起的粒

子数减少和由从高能级的级联过程引起的粒子数再分布等一类的效应时,能级  $\beta$  的粒子数密度减少的速率由下式给出

$$-\frac{dN_{\beta}}{dt} = N_{\beta} \sum_{\alpha} A_{\beta\alpha}, \quad (7)$$

式中求和范围只包括那些比能级  $\beta$  低的能级。受激能级的粒子数指数地衰落

$$N_{\beta}(t) = N_{\beta}(0) \exp(-t \sum_{\alpha} A_{\beta\alpha}), \quad (8)$$

$\beta$  能级的平均辐射寿命为

$$\tau_{\beta} = \int_0^{\infty} t \sum_{\alpha} A_{\beta\alpha} N_{\beta}(t) dt / N_{\beta}(0) = \sum_{\alpha} A_{\beta\alpha} \int_0^{\infty} t \exp(-t \sum_{\alpha} A_{\beta\alpha}) dt = 1 / \sum_{\alpha} A_{\beta\alpha}, \quad (9)$$

因此由(6)式得到每个能级到所有较其低的能级的自发跃迁几率后,取其和的倒数即可直接给出各个能级的寿命。

### 3 计算结果

本文采用全相对论多组态 Dirac-Fock 理论的程序 GRASP<sup>2</sup>, 选用二参数 Fermi 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在不同的轨道上;
- 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。

分别选取奇宇称组态为  $3d^{10}4s^24p$ ; 偶宇称组态为  $3d^94s^24p^2, 3p^53d^{10}4s^24p5d$  和  $3d^94s^24p4f$ , 将这些组态一并输入程序计算  $Au^{48+}$  离子的跃迁波长、能级寿命和能级宽度。计算结果分别见表 1 和表 2。表 2 中只列出有文献值可比的计算结果。

表 1 类镓金  $Au^{48+}$  离子的能级寿命和能级宽度(Coulomb 规范)

Table 1 Level lifetimes and level widths of Ga-like  $Au^{48+}$  (Coulomb gauge)

Level	Level lifetime /ps	Level width / $cm^{-1}$	Level	Level lifetime /ps	Level width / $cm^{-1}$
3	1870.6	$2.8380 \times 10^{-3}$	95	93.920	$5.6525 \times 10^{-2}$
7	1909.3	$2.7805 \times 10^{-3}$	114	110.28	$4.8136 \times 10^{-2}$
11	116.85	$4.5430 \times 10^{-2}$	123	3.4540	1.5370
13	1.8147	2.9254	126	57.119	$9.2943 \times 10^{-2}$
25	1.4719	3.6068	128	256.53	$2.0695 \times 10^{-2}$
26	2.4948	2.1279	131	2.3647	2.2450
30	2.3560	2.2533	135	1.3434	3.9516
31	47.913	0.11080	146	1302.7	$4.0753 \times 10^{-3}$
32	340.53	$1.5589 \times 10^{-2}$	149	1257.2	$4.2225 \times 10^{-3}$
34	4.9429	1.0740	150	1.2339	4.3024
35	1268.2	$4.1859 \times 10^{-3}$	154	204.50	$2.5960 \times 10^{-2}$
38	3.9797	1.3339	157	124.79	$4.2540 \times 10^{-2}$
41	7279.0	$7.2933 \times 10^{-4}$	159	4.8511	1.0943
43	20.005	0.26537	166	1.7642	3.0092
45	57.383	$9.2515 \times 10^{-2}$	168	20.157	0.26337
49	227.53	$2.3333 \times 10^{-2}$	169	39.197	0.13544
55	46620	$1.1387 \times 10^{-4}$	172	2.8353	1.8724
56	31.343	0.16937	174	1.4309	3.7100
59	7.6624	0.69284	181	2.9311	1.8112
60	115.80	$4.5845 \times 10^{-2}$	184	1.4814	3.5836
63	177.75	$2.9867 \times 10^{-2}$	186	1492.7	$3.5564 \times 10^{-3}$
65	477.71	$1.1113 \times 10^{-2}$	189	188.36	$2.8185 \times 10^{-2}$
70	29.682	0.17886	190	141.00	$3.7651 \times 10^{-2}$
72	4.3810	1.2118	193	30.911	0.17174
74	106.88	$4.9670 \times 10^{-2}$	195	2.0714	2.5629
80	4.1885	1.2675	201	1.9127	2.7755
83	5.4704	0.97047	203	7.6476	0.69418
89	1.2256	4.3317	205	39.158	0.13557
91	14.431	0.36787	207	88.795	$5.9788 \times 10^{-2}$
94	5.8427	0.90862	208	46.210	0.11488

表 2 类镓金 Au<sup>48+</sup> 离子的跃迁波长(Coulomb 规范)  
Table 2 Transition wavelengths of Ga-like Au<sup>48+</sup> (Coulomb gauge)

Nonrelativistic electronic configuration	Transition	Wavelength / nm		
	Relativistic electronic state	$\lambda_{\text{cal.}}$	$\lambda_{\text{ref.}}^{[7,8]}$	$\lambda_{\text{exp.}}^{[7,8]}$
$3p^5 3d^{10} 4s^2 4p5d \rightarrow 3d^{10} 4s^2 4p$	$[(3/2, 1/2)2, 5/2]3/2 - (0, 1/2)1/2$	0.3366	0.3364	0.3362
	$[(3/2, 1/2)1, 5/2]3/2 - (0, 1/2)1/2$	0.3367		
	$[(3/2, 3/2)3, 5/2]3/2 - (0, 1/2)1/2$	0.3241		
	$[(3/2, 3/2)2, 5/2]3/2 - (0, 1/2)1/2$	0.3236		
	$[(3/2, 3/2)1, 5/2]3/2 - (0, 1/2)1/2$	0.3243		
	$[(3/2, 1/2)2, 5/2]1/2 - (0, 1/2)1/2$	0.3366		
	$[(3/2, 3/2)3, 5/2]1/2 - (0, 1/2)1/2$	0.3241		
	$[(3/2, 3/2)2, 5/2]1/2 - (0, 1/2)1/2$	0.3238		
	$[(3/2, 1/2)2, 5/2]9/2 - (0, 3/2)3/2$	0.3499		
	$[(3/2, 1/2)2, 5/2]5/2 - (0, 3/2)3/2$	0.3498		
	$[(3/2, 3/2)3, 5/2]5/2 - (0, 3/2)3/2$	0.3366		
	$[(3/2, 3/2)2, 5/2]5/2 - (0, 3/2)3/2$	0.3359		
	$[(3/2, 3/2)1, 5/2]5/2 - (0, 3/2)3/2$	0.3365		
	$[(3/2, 3/2)0, 5/2]5/2 - (0, 3/2)3/2$	0.3344		
	$[(3/2, 1/2)2, 5/2]3/2 - (0, 3/2)3/2$	0.3499		
	$[(3/2, 1/2)1, 5/2]3/2 - (0, 3/2)3/2$	0.3500		
	$[(3/2, 3/2)3, 5/2]3/2 - (0, 3/2)3/2$	0.3365		
	$[(3/2, 3/2)2, 5/2]3/2 - (0, 3/2)3/2$	0.3358		
	$[(3/2, 3/2)1, 5/2]3/2 - (0, 3/2)3/2$	0.3366		
	$[(3/2, 1/2)2, 5/2]1/2 - (0, 3/2)3/2$	0.3499		
$[(3/2, 3/2)3, 5/2]1/2 - (0, 3/2)3/2$	0.3363			
$[(3/2, 3/2)2, 5/2]1/2 - (0, 3/2)3/2$	0.3360			
$3d^9 4s^2 4p^2 \rightarrow 3d^{10} 4s^2 4p$	$[(3/2, 1/2)1, 3/2]3/2 - (0, 3/2)3/2$	0.6204	0.6184	0.620
	$[(3/2, 1/2)1, 3/2]5/2 - (0, 3/2)3/2$	0.6207	0.3186	
	$[3/2, (1/2, 1/2)0]3/2 - (0, 1/2)1/2$	0.6213	0.6193	
	$[(3/2, 1/2)1, 3/2]1/2 - (0, 3/2)3/2$	0.6214	0.6193	
	$[(3/2, 1/2)2, 3/2]5/2 - (0, 3/2)3/2$	0.6228	0.6208	
	$[5/2, (3/2, 3/2)2]3/2 - (0, 3/2)3/2$	0.6055	0.6035	
	$[5/2, (3/2, 3/2)2]5/2 - (0, 3/2)3/2$	0.6057	0.6037	
	$[(5/2, 1/2)2, 3/2]1/2 - (0, 1/2)1/2$	0.6062	0.6042	
	$[(5/2, 1/2)2, 3/2]3/2 - (0, 1/2)1/2$	0.6064	0.6044	
	$[(5/2, 1/2)3, 3/2]3/2 - (0, 1/2)1/2$	0.6078	0.6058	
$3d^9 4s^2 4p4f \rightarrow 3d^{10} 4s^2 4p$	$[(3/2, 3/2)3, 5/2]1/2 - (0, 3/2)3/2$	0.4852	0.4839	0.503
	$[(3/2, 3/2)2, 5/2]5/2 - (0, 3/2)3/2$	0.4853	0.4840	
	$[(3/2, 1/2)2, 5/2]1/2 - (0, 1/2)1/2$	0.4856	0.4843	
	$[(3/2, 3/2)3, 5/2]3/2 - (0, 3/2)3/2$	0.4857	0.4845	
	$[(3/2, 1/2)1, 5/2]3/2 - (0, 1/2)1/2$	0.4862	0.4849	
	$[(5/2, 3/2)4, 7/2]1/2 - (0, 3/2)3/2$	0.5023	0.5012	
	$[(5/2, 3/2)3, 7/2]5/2 - (0, 3/2)3/2$	0.5028	0.5016	
	$[(5/2, 3/2)4, 7/2] 3/2 - (0, 3/2)3/2$	0.5030	0.5019	
	$[(5/2, 1/2)2, 7/2]3/2 - (0, 1/2)1/2$	0.5032	0.5020	
	$[(5/2, 1/2)3, 7/2]1/2 - (0, 1/2)1/2$	0.5033	0.5021	

表 2 中的相对论电子状态为  $[(j_a, j_b)J_1, j_c]J$ , 其中  $j$  为相对论未满壳层上电子的角动量。由表 2

的结果可以看出,波长的计算值与实验值符合较好, 误差只有几个  $10^{-4}$  nm,在实验允许的误差范围之

内<sup>[7,14]</sup>。这说明计算中,我们所选的电子组态比较完备合理。分析计算得到的跃迁几率和振子强度发现,在 Au<sup>48+</sup> 离子体系中,主要的跃迁是发生在 3*d* 和 4*f* 之间,这正好验证了金等离子体中高离化光谱特征实验结果<sup>[15]</sup>。由此可以认为,该系统计算所得的能级寿命结果也具有一定的参考价值。表 1 中从上到下再从左到右,能级越来越高。计算结果表明,能级寿命的大小决定于能级能量的高低和其向所有低能级跃迁几率之和的大小。能级能量高的,能级寿命小,跃迁几率大的,能级寿命小。能级能量相差不大时,能级寿命的大小主要由其到所有下能级跃迁几率的总和决定。限于篇幅,能级寿命小于皮秒量级的未予列出。

## 4 讨 论

能级寿命为该能级到所有低能级跃迁几率的倒数的倒数。本文计算的是电偶极跃迁,因此能级寿命计算结果的准确性与组态的选取有密切关系。根据本文所选电子组态计算得到的跃迁波长  $\lambda_{\text{cal}}$  与实验值  $\lambda_{\text{exp}}$  符合得很好,  $\Delta\lambda$  一般为几个  $10^{-4}$  nm, 可以认为所选组态比较合理与完备。这些电子状态的寿命值未见文献报道,可以相信本文所计算的寿命值有一定的合理性,可用作进一步研究的参考数据。

能级寿命大的,其能级宽度则小,这一点符合海森堡的能量与时间测不准原理。根据海森堡的测不准关系有  $\Delta E \Delta t \sim \hbar$ , 例如,能级 13 的谱线宽度  $\Delta E = 2.9254 \text{ cm}^{-1}$ , 则  $\Delta t = \hbar / 2.9254 = 6.626176 \times 10^{-27} \times 5.034 \times 10^{15} / (2\pi \times 2.9254) = 1.8147 \text{ ps}$ , 文中计算结果与之相符。显然,  $\Delta E$  越大,  $\Delta t$  越小。

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:

$$A = \frac{16\pi^4 e^2 a_{0n}^3}{3h} S \sum \left( \begin{matrix} J & 1 & J' \\ M & q & M' \end{matrix} \right)^2, \quad (10)$$

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。

研究原子态寿命是原子分子物理的最活跃领域之一,这既涉及基本原子分子物理学科,又对天体物理谱线丰度、光学激发过程以及等离子体诊断具有十分重要的意义,本文乃系列研究之一。

## 参 考 文 献

- Zhu Jiabin, Ji Zhonggang, Deng Yunpei *et al.*. Study on lifetime of a plasma channel induced by femtosecond laser pulses and an external electric field [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(6): 1059~1062  
朱佳斌, 季忠刚, 邓蕴沛 等. 外加高压电场下空气中激光等离子体通道寿命研究 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(6): 1059~1062
- Wen Shenglin, Su Jingqin, Yang Chunlin *et al.*. Long-focal-depth lens for laser plasma diagnostic system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(9): 1260~1262  
温圣林, 粟敬钦, 杨春林 等. 用于激光等离子体诊断系统的长焦深透镜 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(9): 1260~1262
- 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
- Uif Litzen, Joseph Reader. Spectra and energy levels of the galliumlike ions Rb VII-Mo XII [J]. *Phys. Scr.*, 1989, **39**: 73~80
- Joseph Reader, Nicolo Acquista, Samuel Goldsmith.  $4s^2 4p-4s4p^2$  and  $4s^2 4p-4^2 s5s$  transitions of galliumlike ions from Rb VII to In XIX [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1986, **B3**(6): 874~878
- C. Bauche-Arnoult, E. Luc-Koenig, J. F. Wyart *et al.*. Interpretation of the spectra of a laser-irradiated Au plasma in the 3.0-4.0 Å range [J]. *Phys. Rev.*, 1986, **A33**: 791~793
- M. Busquet D. Pain J. Bauche, E. Luc-koenig. Study of X-ray spectrum of laser-produced gold plasmas [J]. *Phys. Sci.*, 1985, **31**: 137~148
- N. Tragin, J. P. Geindre, P. Minier *et al.*. Extended analysis of the X-ray spectra of laser-irradiated elements in the sequence from tantalum to lead [J]. *Phys. Scr.*, 1988, **37**: 72~82
- J. C. Gauthier, P. Monier, P. Audebert *et al.*. X-ray spectroscopy of high-Z materials [J]. *Laser Particle Beams*, 1986, **4**: 421~425
- Liu Xiaohong, Cheng Xinlu, Jiao Rongzhen *et al.*. Theoretical calculation of spectrum of m band for Au using utamodel [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1998, **10**(3): 437~440  
刘小红, 程新路, 焦荣珍 等. UTA 模型下金 M 带谱的理论计算 [J]. *强激光与粒子束*, 1998, **10**(3): 437~440
- Yang Guohong, Zhang Jiyan, Zhang Baohan *et al.*. Analysis of fine structure of X-ray spectra from laser-irradiated gold dot [J]. *Acta Physica Sinica*, 2000, **49**(12): 2389~2393  
杨国红, 张继彦, 张保汉 等. 金激光等离子体 X 射线精细结构谱研究 [J]. *物理学报*, 2000, **49**(12): 2389~2393
- Zhang Jiyan, Yang Guohong, Zhang Baohan *et al.*. Modeling the spectra of laser-produced Au plasmas in the range 0.3~0.4 nm [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2001, **13**(2): 186~190  
张继彦, 杨国洪, 张保汉 等. Au 激光等离子体 0.3~0.4 nm X 射线发射谱模拟 [J]. *强激光与粒子束*, 2001, **13**(2): 186~190
- A. I. Akhiezer, V. B. Berestetskii. *Quantum Electrodynamics* [M]. New York: Interscience Publisher, 1965
- C. M. Brown, J. F. Seely, D. R. Kania *et al.*. Wavelengths and energy levels for the Zn I isoelectronic sequence Sn<sup>20+</sup> through U<sup>62+</sup> [J]. *At. Data Nucl. Data Tables*, 1994, **58**: 203~217
- P. Mandelbaum, J. F. Seely, A. B. Shalom *et al.*. Effect of configuration mixing on 3*d*-4*f* transitions in highly ionized Ga-, Zn-, and Cu-like ions [J]. *Phys. Rev.*, 1991, **A44**: 5744~5751