

文章编号: 1001-4322(2002)04-0571-06

镁铝类氢类氦类锂离子双电子复合速率研究

盛 勇¹, 蒋 刚², 朱正和²

(1 四川大学 材料科学与工程学院, 四川 成都 610065; 2 四川大学 原子分子物理研究所, 四川 成都 610065)

摘 要: 镁铝类氢类氦类锂离子经中间双激发态进行的双电子复合过程在用双示踪元素谱线强度比研究 ICF 电子温度中占有很重要的地位。计算了双电子复合经不同 Rydberg 态跃迁通道的复合速率系数, 并给出不同离化度的总的双电子复合速率系数的变化规律, 比较了它们在不同电子温度和不同跃迁通道的异同, 对研究 X 射线激光、等离子体温度诊断等诸多应用领域提供了有价值的原子数据。

关键词: 双电子复合; 镁离子; 铝离子; 类氢; 类氦; 类锂

中图分类号: O53 **文献标识码:** A

在高温低密等离子体中, 双电子复合对电离平衡的建立和维持以及离子的激发态分布起着重要的作用^[1,3]。等离子体中各种原子的衰变、复合过程会产生大量的 X 射线, 形成一个具有温度梯度的辐射场。双电子复合发射的 X 射线已成为等离子体温度诊断的重要手段^[4-6]。因此, 计算出精确的电离和复合速率的数值对相应的研究领域很有必要。国外九十年代发展起来的双示踪元素等离子体谱线法成为诊断等离子体电子温度的一种新方法^[7-9], 它利用原子序数相近的两种示踪元素的等电子离子同一跃迁谱线强度比来确定电子温度。双示踪元素在高功率激光与靶物质相互作用产生的等离子体中会形成不同离化度的离子, 它们在等离子体中的不同特性成为我们选择谱线强度比感兴趣的问题之一。本文着重研究了不同电离度下镁铝类氢类氦类锂离子双电子复合速率系数, 并分析讨论了它们的总双电子复合速率系数随电子温度的变化规律。

1 理论计算

双电子复合过程可以示意地表示为 $e^- + Z^m(N-1) \xrightarrow{\text{capture}} Z^d(N) \xrightarrow{\text{radiative}} Z^k(N) + h\nu$ 。类氢、类氦和类锂的双电子复合过程可分别表示为 $1s^+ \ell c (n \ln \ell')^* \rightarrow 1sn \ell' + h\nu$, $1s^2 + \ell c (1sn \ln \ell')^* \rightarrow 1s^2 n \ell' + h\nu$ 和 $1s^2 2s + \ell c (1s^2 n \ln \ell')^* \rightarrow 1s^2 2sn \ell' + h\nu$ 。选取镁、铝类氢辐射跃迁通道

- (1) $npn \dot{p} \rightarrow 1sn \dot{p}$, $n = 3, 4$, $2 \leq n' \leq 15$;
- (2) $npn \dot{f} \rightarrow 1sn \dot{f}$, $n = 3, 4$, $4 \leq n' \leq 15$;
- (3) $nfn \dot{p} \rightarrow 1snf$, $n = 4, 5$, $5 \leq n' \leq 15$;
- (4) $nsn \dot{p} \rightarrow 1sns$, $n = 3, 4$, $2 \leq n' \leq 15$;
- (5) $ndn \dot{p} \rightarrow 1snd$, $n = 3, 4$, $4 \leq n' \leq 15$;
- (6) $npn \dot{s} \rightarrow 1sn \dot{s}$, $n = 3, 4$, $3 \leq n' \leq 15$;
- (7) $npn \dot{d} \rightarrow 1sn \dot{d}$, $n = 3, 4$, $3 \leq n' \leq 15$ 。

选取镁、铝类氦辐射跃迁通道

- (1) $1snpn \dot{p} \rightarrow 1s^2 n \dot{p}$, $n = 2, 3, 4$, $2 \leq n' \leq 15$;
- (2) $1snpn \dot{f} \rightarrow 1s^2 n \dot{f}$, $n = 2, 3, 4$, $4 \leq n' \leq 15$;
- (3) $1snpn \dot{h} \rightarrow 1s^2 n \dot{h}$, $n = 2, 3, 4$, $6 \leq n' \leq 15$;
- (4) $1snfn \dot{p} \rightarrow 1s^2 n \dot{p}$, $n = 4, 5, 6$, $5 \leq n' \leq 15$;
- (5) $1snhn \dot{p} \rightarrow 1s^2 nh$, $n = 6, 7, 8$, $7 \leq n' \leq 15$;
- (6) $1sn sn \dot{p} \rightarrow 1s^2 ns$, $n = 2, 3, 4$, $2 \leq n' \leq 15$;
- (7) $1s d n \dot{p} \rightarrow 1s^2 nd$, $n = 3, 4, 5$, $4 \leq n' \leq 15$;
- (8) $1s n g n \dot{p} \rightarrow 1s^2 ng$, $n = 5, 6, 7$, $6 \leq n' \leq 15$;
- (9) $1s npn \dot{s} \rightarrow 1s^2 n \dot{s}$, $n = 2, 3, 4$, $3 \leq n' \leq 15$;
- (10) $1s npn \dot{d} \rightarrow 1s^2 n \dot{d}$, $n = 2, 3, 4$, $3 \leq n' \leq 15$;
- (11) $1s npn \dot{g} \rightarrow 1s^2 n \dot{g}$, $n = 2, 3, 4$, $5 \leq n' \leq 15$ 。

选取镁、铝类锂离子辐射跃迁通道

- (1) $1s^2 npn \dot{p} \rightarrow 1s^2 2sn \dot{p}$, $n = 3, 4$, $2 \leq n' \leq 15$;
- (2) $1s^2 npn \dot{f} \rightarrow 1s^2 2sn \dot{f}$, $n = 3, 4$, $4 \leq n' \leq 15$;
- (3) $1s^2 nfn \dot{p} \rightarrow 1s^2 2snf$, $n = 4, 5$, $5 \leq n' \leq 15$;
- (4) $1s^2 n sn \dot{p} \rightarrow 1s^2 2sns$, $n = 3, 4$, $2 \leq n' \leq 15$;
- (5) $1s^2 ndn \dot{p} \rightarrow 1s^2 2snd$, $n = 3, 4$, $4 \leq n' \leq 15$;
- (6) $1s^2 npn \dot{s} \rightarrow 1s^2 2sn \dot{s}$, $n = 3, 4$, $3 \leq n' \leq 15$;
- (7) $1s^2 npn \dot{d} \rightarrow 1s^2 2sn \dot{d}$, $n = 3, 4$, $3 \leq n' \leq 15$ 。

收稿日期: 2001-07-17; 修订日期: 2002-01-16

基金项目: 国家自然科学基金(199974026)资助项目

作者简介: 盛 勇(1960-), 男, 重庆市人, 四川大学材料科学与工程学院博士后, 主要从事原子结构及光谱研究, 现从事材料研究。

本计算采用 Cowan 多组态准相对论 HFR 程序, 求解束缚态轨道波函数时考虑了主要的相对论修正, 径向 Schrodinger 方程中包括了相对论速率-质量修正, Darwin 项, Hamiltonian 中包括了电子动能, 静电能和旋-轨相互作用能。另外, 还粗略地考虑了 Breit 修正及延迟能量, 自由电子连续态波函数采用了畸变波近似。

对于具有 $N-1$ 个电子的离子 ($Z, N-1$), 从初态 i 经过中间双激发态 j 到最后单激发态 k 的态-态双电子复合速率系数可表示为^[10]

$$\alpha_{jk}^d(T) = \alpha_{i,jk}^d(T) = \frac{4\pi^{3/2}a_0^3}{T^{3/2}} e^{-E_{j0}^m/T} \frac{g_i}{g_{m_0}} A_{jm}^a A_{jk}^r / (A_{jm}^a + A_{jk}^r) \quad (1)$$

式中: T 为自由电子温度; a_0 是 Bohr 半径; g_i, g_j 分别是 i 态 j 态的统计权重; $E_s = E_j - E_i$; A_{ji}^a 是离子从 j 态到 i 态的自电离速率; A_{jk}^r 是从 j 态到 k 态的自发辐射速率; 其中 T 和 E_s 均以 Rydberg 为单位。

考虑到在中低密度离子的碰撞激发可以忽略, 假设离子在复合前处于基组态, 因此 $j-k$ 通道的净有效复合速率系数应该是对基组态所有能级的加权平均, 即

$$\alpha_{jk}^d(T) = \frac{1}{n_{N-1m}} n_{N-1m}^m \alpha_{i,jk}^d(T) \quad (2)$$

将(1)式代入(2)式得

$$\alpha_{jk}^d(T) = \frac{4\pi^{3/2}a_0^3}{T^{3/2}} e^{-E_s/T} \left(\frac{g_m}{G_m}\right) A_{jm}^a A_{jk}^r / (A_{jm}^a + A_{jk}^r) \quad (3)$$

式中: $G = \sum g_i$, 表示总的基电子组态统计权重; E_s 是基电子组态中 $E_j - E_i$ 的平均能, 即平均自由电子能量; 自电离速率 A_{ji}^a 和自发辐射速率可用微扰理论求出

$$A_{ji}^a = \frac{2\pi}{\hbar} |j|H|i|^2 = \frac{2\pi}{\hbar} |j|b|b'|i|^2 \quad (4)$$

$$A_{jk}^r = 4\alpha\Delta_{jk}^3/3\hbar^3c^2 |j|r|k|^2 \quad (5)$$

式中: $|a\rangle, |b\rangle$ 分别为束缚态和连续态基函数; $a = e^2/4\pi\epsilon_0\hbar c$ 为精细结构常数; $\Delta = E_i - E_k$; r 为电偶极矩算符。

2 结果与讨论

前面给出了所选择的辐射跃迁通道类型。从理论上讲某种元素或某种离化态的总双电子复合系数为该离子所有复合通道的双电子复合速率系数之和, 即所有态-态复合速率系数之和。但是, 由于态-态复合通道有无限多个, 因此求出完整的总双电子复合系数是不可能的。我们只能最大限度地选取对总双电子复合系数有主要贡献的复合通道类型。实际上本文对 Mg, Al 类氢类氦类锂总双电子复合系数的计算所选择的复合通道, 基本上包含了主要的双电子复合通道。考虑的电子温度范围为 0.01~10keV。Mg, Al 类氢类氦类锂总双电子复合系数数据列于表 1。根据表 1 所作图 1 反映 Mg, Al 类氢总双电子复合系数与电子温度的关系。在高温区域和低温区域有所不同, 有一交叉点, 交叉点的温度为 $T = 1.11\text{keV}$, 对应的双电子复合系数 $a^{\text{DR}} = 9.65 \times 10^{-13} \text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 以交叉点温度为界。在低温区 Mg 的复合系数要稍高于 Al 的复合系数, 在高温区域则刚好相反。总双电子复合系数在高温区逐渐减小, 收敛趋势基本相同。这一特点与 Karim^[11] 等的文章结论相同。二者峰值点的温度和双电子复合系数分别为: Mg, He-like, $T = 0.8\text{keV}$, $a^{\text{DR}} = 1.05 \times 10^{-12} \text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; Al, He-like, $T = 0.95\text{keV}$, $a^{\text{DR}} = 0.988 \times 10^{-12} \text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。在整个温度段, Mg, Al 的 a^{DR} 最大相差分别为 $0.32 \times 10^{-13} \cdot \text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $-3.7 \times 10^{-13} \text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 它反映出从峰值点开始 Mg 的 He-like 总复合系数 a^{DR} 下降比 Al 的 a^{DR} 快。在低温区域二者即表现出不同的差异, 这是因为对 He-like 而言, 原子实 $1s3p$ 有不同的耦合方式, 可以耦合为单重态和三重态, 造成能量和简并度的不同, 从而影响双电子复合系数。

图 2 显示了 Mg, Al 类锂总双电子复合系数与电子温度的关系。Mg, Al 类锂的总双电子复合系数有尖锐的共振峰, 达到 10^{-12} 的数量级, Mg g^+ 的 a^{DR} 峰值为: $T = 0.104\text{keV}$, $a^{\text{DR}} = 2.4 \times 10^{-12} \text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; Al l^+ 的 a^{DR} 峰值为, $T = 0.15\text{keV}$, $a^{\text{DR}} = 2.3 \times 10^{-12} \text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。Al 离子的峰值温度只向高温段移动了约 50eV, 而 He-like 移动的电子温度为 150eV, 根据 Z 标度规则, 二者的相对位移是大致相同的。峰值之后, 总复合系数迅速下降, 到 4000eV 之后几乎是平缓变化。对于 Mg 和 Al 来说, 从 0~0.15keV, 两者的双电子复合系数同步上升, 曲线几乎重合, 说明二者在低温区具有良好的一致性, 低能跃迁的机理很相似。在 $T = 0.15\text{keV}$ 处, Mg 和 Al 两条曲线相交, 二者复合系数的大小相互发生变化。

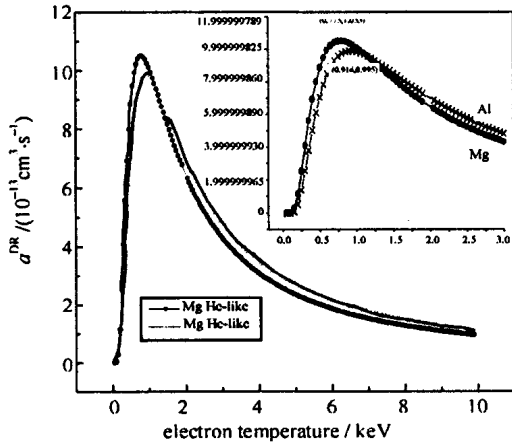


Fig 1 Total dielectronic recombination coefficient for He-like Mg and Al ions vs electron temperature
图 1 Mg, Al 类氦总双电子复合系数与电子温度的关系

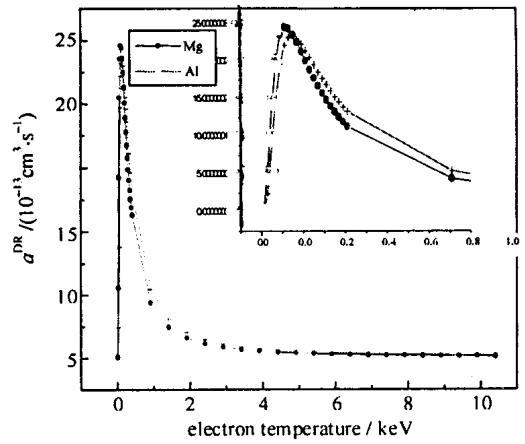


Fig 2 Total dielectronic recombination coefficient for Li-like Mg and Al ions vs electron temperature
图 2 Mg, Al 类锂总双电子复合系数与电子温度的关系

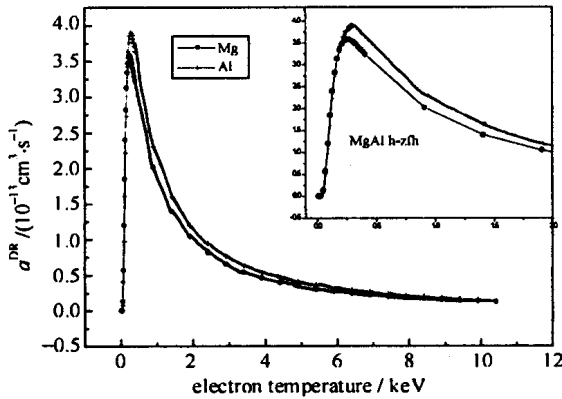


Fig 3 Total dielectronic recombination coefficients for H-like Mg and Al ions vs electron temperature
图 3 镁铝类氢离子总双电子复合系数与电子温度的关系

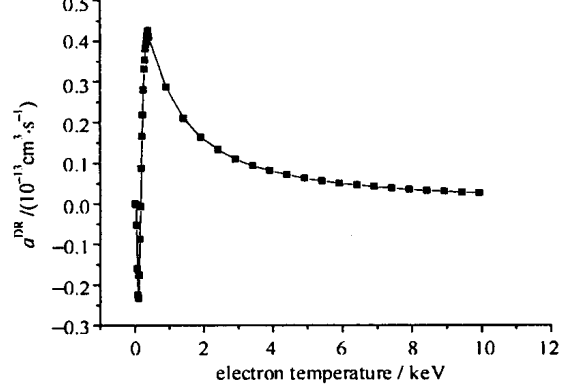


Fig 4 Differences between H-like Al and Mg ions' recombination coefficients vs electron temperature
图 4 镁铝类氢总复合系数差值与电子温度的关系

图 3 是 Mg, Al 类氢总双电子复合系数与电子温度的关系。Mg, Al 类氢的双电子复合系数有尖锐的共振峰, 峰值都在 0.25~0.29keV 附近。Mg, Al 类氢离子在 0.03~0.20keV 的温度范围内, 两者的双电子复合系数同步上升, 曲线几乎重合, 说明二者在低温区具有很好的一致性。所不同的是表现在 Mg 离子比 Al 离子先达共振温度。二者的峰值温度和相应的总复合系数分别是 $T_{Mg} = 0.247\text{keV}$, $a_{Mg}^{DR} = 3.59 \times 10^{-13} \text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $T_{Al} = 0.291\text{keV}$, $a_{Al}^{DR} = 3.90 \times 10^{-13} \text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。两条曲线的半高宽也不相同, Al 类氢的半高宽约为 0.94keV, 而 Mg 类氢的半高宽约为 1.0keV, 表明在高温区 Mg 的 a^{DR} 下降比 Al 的 a^{DR} 更慢。当自电离能级增大后, 只有在更高的电子温度下, 具有更大动能的电子才能复合到该离子的自电离态上去, 满足其共振俘获条件 $|(E_j - E_m) - \epsilon| \leq \delta E_{j\epsilon}$ 。所以, 双电子复合速率系数的共振温度随 Z 的增大向高温端移动。我们知道 Z 大的元素在自电离态上的能级分布要大于轻元素的能级分布, 它取决于各量子数 n, l, m_z, m_s 以及它们之间的耦合, 并近似与 Z^2 成正比, 因而, 铝的双电子复合系数共振峰向高温方向移动是合理的。

图 4 表明在整个电子温度区域, 铝的类氢总双电子复合系数与镁的复合系数差值变化与电子温度的关系,

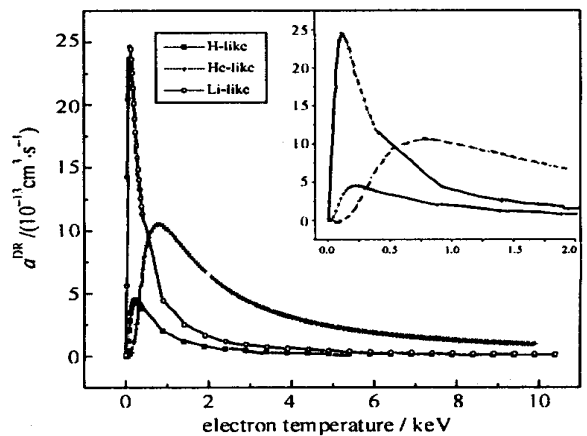


Fig 5 Total dielectronic recombination coefficient for H-like He-like Li-like Mg vs electron temperature
图 5 镁类氢类氦类锂离子双电子复合系数与电子温度的关系



特别是在 $0.15 \sim 10 \text{keV}$ 电子温度范围内, 差值随电子温度的变化具有同总双电子复合系数相同的趋势, 也就是说镁和铝的类氢总双电子复合过程具有相似性, 它们既有区别(随电子温度有规律地变化), 又不至于使二者差别过大而无法测定。在整个测温段, Al 的双电子复合系数都比 Mg 的复合系数大, 而且峰值温度点在 300eV 左右, 正是中度等离子体的测温范围。相比之下, Li-like 离子的共振温度较低, 而 He-like 离子的共振温度又大

表 1 镁铝类氢类氦类锂总的双电子复合系数数据

Table 1 Total dielectronic recombination rate coefficients of H-like, He-like and Li-like Mg and Al ions

T_e/keV	H-like		He-like		Li-like	
	Mg	Al	Mg	Al	Mg	Al
0.01	8.94E-72	6.80E-26	1.06E-52	6.23E-60	8.13E-15	1.60E-15
0.03	8.21E-19	1.23E-16	2.73E-25	1.34E-27	5.58E-13	2.45E-13
0.05	6.99E-16	7.58E-15	5.58E-20	2.63E-21	1.43E-12	8.78E-13
0.07	6.39E-15	4.07E-14	9.40E-18	1.13E-18	2.05E-12	1.53E-12
0.09	1.78E-14	9.75E-14	1.61E-16	3.10E-17	2.36E-12	1.97E-12
0.11	3.11E-14	1.62E-13	1.00E-15	2.55E-16	2.46E-12	2.22E-12
0.13	4.30E-14	2.22E-13	3.60E-15	1.09E-15	2.44E-12	2.32E-12
0.15	5.26E-14	2.73E-13	9.22E-15	3.23E-15	2.36E-12	2.34E-12
0.17	5.96E-14	3.12E-13	1.89E-14	7.38E-15	2.25E-12	2.30E-12
0.19	6.44E-14	3.43E-13	3.32E-14	1.42E-14	2.13E-12	2.23E-12
0.21	6.74E-14	3.64E-13	5.21E-14	2.40E-14	2.01E-12	2.14E-12
0.23	6.91E-14	3.77E-13	7.51E-14	3.71E-14	1.89E-12	2.05E-12
0.25	6.97E-14	3.86E-13	1.01E-13	5.31E-14	1.78E-12	1.96E-12
0.27	6.96E-14	3.90E-13	1.30E-13	7.17E-14	1.67E-12	1.86E-12
0.29	6.90E-14	3.90E-13	1.61E-13	9.27E-14	1.58E-12	1.77E-12
0.31	6.80E-14	3.89E-13	1.91E-13	1.15E-13	1.49E-12	1.69E-12
0.33	6.66E-14	3.86E-13	2.24E-13	1.39E-13	1.40E-12	1.61E-12
0.35	6.52E-14	3.81E-13	2.55E-13	1.64E-13	1.33E-12	1.53E-12
0.37	6.35E-14	3.76E-13	2.85E-13	1.89E-13	1.26E-12	1.46E-12
0.39	6.19E-14	3.71E-13	3.14E-13	2.14E-13	1.19E-12	1.39E-12
0.89	6.02E-14	3.64E-13	5.82E-13	5.41E-13	1.13E-12	1.33E-12
1.39	5.15E-14	2.31E-13	5.10E-13	5.20E-13	4.41E-13	5.45E-13
1.89	4.41E-14	1.61E-13	4.14E-13	4.42E-13	2.46E-13	3.10E-13
2.39	3.80E-14	1.20E-13	3.37E-13	3.70E-13	1.62E-13	2.05E-13
2.89	3.31E-14	9.44E-14	2.80E-13	3.12E-13	1.16E-13	1.48E-13
3.39	2.91E-14	7.65E-14	2.36E-13	2.65E-13	8.90E-14	1.14E-13
3.89	2.58E-14	6.35E-14	2.02E-13	2.29E-13	7.09E-14	9.07E-14
4.39	2.31E-14	5.39E-14	1.75E-13	2.00E-13	5.82E-14	7.46E-14
4.89	2.08E-14	4.64E-14	1.53E-13	1.77E-13	4.87E-14	6.26E-14
5.39	1.88E-14	4.05E-14	1.36E-13	1.58E-13	4.18E-14	5.36E-14
5.89	1.72E-14	3.58E-14	1.21E-13	1.41E-13	3.62E-14	4.66E-14
6.39	1.57E-14	3.19E-14	1.09E-13	1.28E-13	3.18E-14	4.10E-14
6.89	1.45E-14	2.87E-14	9.90E-14	1.16E-13	2.82E-14	3.63E-14
7.39	1.34E-14	2.60E-14	9.03E-14	1.06E-13	2.52E-14	3.25E-14
7.89	1.24E-14	2.37E-14	8.29E-14	9.75E-14	2.28E-14	2.94E-14
8.39	1.16E-14	2.17E-14	7.62E-14	9.00E-14	2.07E-14	2.67E-14
8.89	1.08E-14	1.99E-14	7.06E-14	8.34E-14	1.89E-14	2.44E-14
9.39	1.01E-14	1.84E-14	6.55E-14	7.75E-14	1.74E-14	2.24E-14
9.89	9.52E-15	1.71E-14	6.11E-14	7.23E-14	1.60E-14	2.07E-14
10.39	8.97E-15	1.59E-14	5.70E-14	6.77E-14	1.48E-14	1.92E-14

高,加之类氢的电子数少,耦合较为简单,便于光谱测量。因此,选择镁和铝的类氢离子同一跃迁谱线强度比作为示踪元素测量中等等离子体温度是可行的,其效果将优于镁、铝的类氢和类锂离子光谱测量。

图5是Mg的H-like, He-like和Li-like离子的总双电子复合系数比较。Mg属于低Z元素,在中高温等离子体中极易电离成H-like, He-like和Li-like离子,而且双电子复合系数共振峰对应的温度也较低。从图5可以看出:(1)共振峰对应的电子温度高低排列为 $T_{\text{He}} > T_{\text{H}} > T_{\text{Li}}$,分别是0.8keV, 0.23keV和0.11keV;(2)共振峰对应的总双电子复合系数 $\alpha_{\text{Li}}^{\text{DR}} > \alpha_{\text{He}}^{\text{DR}} > \alpha_{\text{H}}^{\text{DR}}$,分别为 $2.46 \times 10^{-12} \text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $1.05 \times 10^{-12} \text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $0.36 \times 10^{-12} \text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。Li-like的 $\alpha_{\text{Li}}^{\text{DR}}$ 增加很陡很快,最先到达共振峰。相对而言,He-like就要缓慢得多,而且趋于高温时,He-like的 $\alpha_{\text{He}}^{\text{DR}}$ 仍要大于H-like和Li-like的复合系数。从图5还可以看出,低温段(0.55keV附近)主要是以Li-like和H-like复合过程为主,高温段以He-like复合过程为主。在 $T=0.3\text{keV}$ 和 $T=0.55\text{keV}$ 处分别与H-like和Li-like有交叉点,超过该点温度He-like的 $\alpha_{\text{He}}^{\text{DR}}$ 值大于H-like和Li-like,并且逐渐扩大,直到0.8keV附近,差距减小。由于类氢和类锂具有相似的原子结构,类氢离子无相关能,类锂离子的相关能为0.0034u,而类氦离子的相关能为0.0421u,所以,类氢的1s电子和类锂的2s电子极易被激发到高能级,与被俘获的自由电子形成Rydberg态。在低温区域,处于Rydberg自电离态的类氢和类锂离子布居数比类氦离子多,因此在低温区,以类氢和类锂的双电子复合为主。

3 结论

Mg, Al都是低Z元素,在中高温等离子体中很容易电离成为类氢类氦类锂离子,在所选温度范围(0.01~10keV)内,Mg, Al的类氢类氦类锂总双电子复合系数都有共振峰型、峰值点、半高宽和高温收敛性。在低温区(300eV左右),以类氢和类锂的双电子复合为主;在高温区(1000eV左右),以类氦的双电子复合过程为主。随着原子序数的增加,峰值向高温段移动,且在高温区都有明显的收敛性。在整个温度段,Al的类氢离子总双电子复合系数都比Mg的类氢离子双电子复合系数大,该特性对于用镁铝作为示踪元素进行谱线强度比测温是有益的。

参考文献

- [1] Karim K R, Bhalla C P. Dielectronic recombination rate coefficients of hydrogenlike ions in high-temperature low-density plasmas[J]. *Phys Rev A*, 1988, **37**(7): 2599—2604.
- [2] Karim K R, Bhalla C P. Satellite spectra from high-lying resonance states for helium like Si, Ca and Ti[J]. *Phys Rev A*, 1994, **45**(6): 3932—3937.
- [3] Clenger S H, et al. Thomson scattering from high-Z laser-produced plasmas[J]. *Phys Rev Lett*, 1999, **82**(1): 97—100.
- [4] Tong Farmer. In temperature and Humidity measurement[M]. Chapter 6, edited by Robin E. Bentley (Springer-verlag (Springer-verlag Singapore Pte. Ltd), 1998 119—131.
- [5] Teng H G, Xu Z Z, Shen B Fet. Concise rate coefficient formulas for dielectronic recombination of the He-like isoelectronic sequence[J]. *Phys Scr*, **49**(6): 696—698.
- [6] Schneider M B, Knapp D A, Chen M H. Measurement of the LMM dielectronic recombination resonances of Ne-like gold[J]. *Phys Rev A*, 1992, **45**, 1291—1294.
- [7] Shepard T D, Back C A. T_e measurement in open and closed-geometry long-scale-length laser plasmas via isoelectronic X-ray spectral line ratios[J]. *Rev Sci Instrum*, 1995, **66**(1): 749—751.
- [8] Marribanks R S, Budnik F, et al. Isoelectronic line intensity ratios for plasma electron temperature measurement[J]. *Rev Sci Instrum*, 1995, **66**(1): 683—688.
- [9] Shepard T D, Back C A, Kalantar D H, et al. Isoelectronic X-ray spectroscopy to determine electron temperature in long-scale-length inertial-confinement-fusion plasmas[J]. *Phys Rev E*, 1996, **53**(5): 5291—5301.
- [10] Cowan R D. The theory of atomic structure and spectra[M]. America: Univ. Of California Press, Berkeley, 1981.
- [11] Karim K R, Ruesink M, et al. Dielectronic recombination from high-lying resonance states in H-like silicon, calcium, and iron[J]. *Phys Rev A*, 1992, **46**: 3904—3909.

Dielectronic-recombination rate study of H-like, He-like and Li-like Mg and Al ions

SHENG Yong¹, JIANG Gang², ZHU Zheng-he²

(1. Material Science and Engineering College, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. Institute of Atomic and Molecular Physics, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract The physical process of dielectronic recombination for H-like, He-like and Li-like ions of Mg and Al in the meridional double ionized states plays an important role in studying laser inertial confinement fusion (ICF) electronic temperature by the method of the double-traced materials isoelectronic X-ray spectrum. This paper presents the dielectronic recombination rate coefficients with different Rydberg configuration states channels. The rate coefficients of different ionized states are given and compared with variable temperature and transition channels.

Key words: dielectronic recombination; Mg ions; Al ions; hydrogenlike; helium like; lithium like