

# 类 Be 氦离子振子强度和跃迁光谱

金石琦 徐至展

(中国科学院上海光学精密机械研究所强光光学开放研究实验室, 上海 201800)

**摘 要** 研究了类 Be 氦离子内壳层电子光电离的激发能级、寿命和辐射速率、谱线波长和振子强度, 并给出了位于“冰窗”波段的谱线波长和谱线强度。

**关键词** 光电离, 寿命, 辐射速率, 振子强度。

## 1 引 言

随着高强度激光的发展, 激光与物质的相互作用产生许多新的物理现象。光场诱导电离和光场诱导激发都可产生波长较短的软 X 射线和“冰窗”波段的发射<sup>[1]</sup>。最近有实验报道了锂原子偶宇称态的光电离和光激发<sup>[2]</sup>。本文用 Cowan 程序计算了类 Be 氦离子内壳层电子光电离的激发能级、辐射速率、谱线波长, 用自编的 ARBE 程序计算了寿命和振子强度, 并给出了位于“冰窗”波段的谱线波长和谱线强度。

## 2 基本理论

设类 Be 氦离子体系的哈密顿量为

$$H = - \sum_{i=1}^4 \nabla_i^2 - \sum_{i=1}^4 \frac{2Z}{r_i} + \sum_{i>j} \frac{2}{r_{ij}} + \sum_{i=1}^4 \zeta(r_i) (l_i s_i) \quad (1)$$

式中第一项为电子动能项, 第二项为电子与原子核相互作用项, 即电子受原子核库仑场的作用, 第三项为电子与电子之间的相互作用项, 最后一项为电子自旋与轨道之间的耦合项,  $r_i = |\mathbf{r}_i|$  为第  $i$  个电子到原子核间的距离,  $r_{ij} = |\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|$  为第  $i$  个电子与第  $j$  个电子之间的距离, 式中各项求和遍及全部电子对。距离以玻尔半径为单位, 能量以里德堡常数为单位。求解薛定谔方程

$$H \Psi = E \Psi \quad (2)$$

式中  $E$  为体系能量,  $\Psi$  为体系波函数。设体系初态波函数为  $\psi_j$ , 末态波函数为  $\psi_m$ , 则辐射速率可由下式求得:

$$A_r(j \rightarrow m) = \frac{2\pi}{3(2J_j + 1)} |\langle \psi_m | \mathbf{P}^{(1)} | \psi_j \rangle|^2 \quad (3)$$

式中  $J_j$  为初态的总角动量量子数,  $\mathbf{P}^{(1)}$  为一阶张量算符。谱线的强弱由振子的强度决定:

$$f_{jm} = \frac{(E_m - E_j)}{3(2J + 1)} |\langle \psi_m | | \mathbf{P}^{(1)} | | \psi_j \rangle|^2 \quad (4)$$

式中  $E_m - E_j$  为能级跃迁, 以里德堡常数为单位。总振子强度为:

$$gf = (2J + 1)f_{jm} \quad (5)$$

$g$  为统计权重。

### 3 “水窗”波段的谱线波长

图 1 是位于“水窗”2.7100 nm 至 2.8453 nm 波段的类 Be 氩离子的光谱和谱线强度, 在这一波段中共有 22 条谱线, 但只有七条谱线的光强不为零, 其中最强的谱线位于 2.7270 nm, 其强度为 0.0012。图 2 则是位于“水窗”2.6698 nm 至 2.4851 nm 波段的光谱和谱线强度, 这段波长区间有 33 条谱线, 其中谱线强度不为零的有六条, 分别是 2.6152 nm、强度为 0.0008; 2.5928 nm、强度为 0.0673; 2.5542 nm、强度为 0.0915; 2.5405 nm、强度为 0.0544; 2.5353 nm、强度为 0.0185。2.5542 nm 谱线的强度为这段波长强度之最。

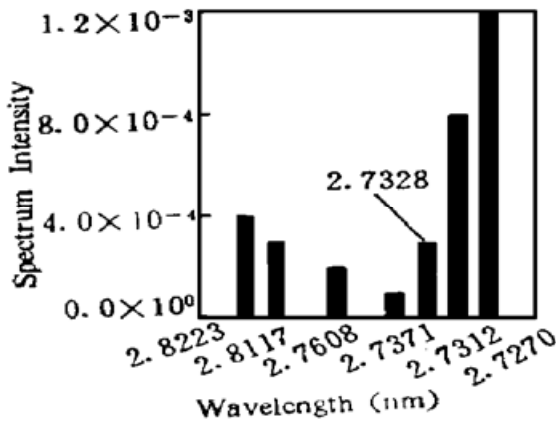


Fig. 1 Be-like Ar ion spectrum intensity

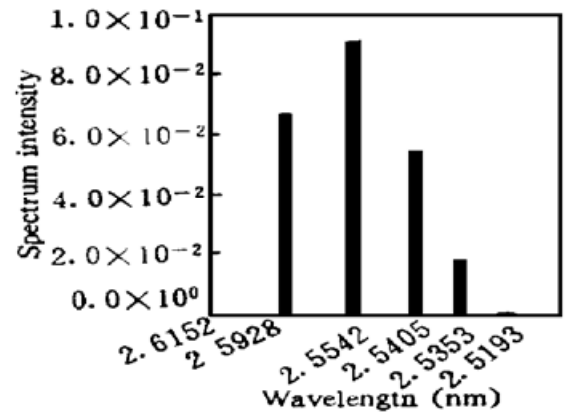


Fig. 2 Be-like Ar ion spectrum intensity

### 4 类 Be 氩离子内壳层电子激发能级、寿命和辐射速率

表 1 给出类 Be 氩离子内壳层电子激发能级的能量、寿命和辐射速率,  $J$  为总角动量。其中有两个态近乎是稳态形式, 一个是  $1s^1 2s^2 2p^1 P_{0,0}$ , 另一个是  $1s^1 2s^2 2p^1 P_{2,0}$ , 这两个态的辐射速率都为零, 寿命为  $7.200 \times 10^{75}$  s。单重态的寿命相对要短, 一般都在  $10^{-14}$  量级范围内, 三重态的寿命要相对长些, 比单重态的寿命要长 2 到 4 个数量级。

Table 1. Be-like Ar ions inner shell excited levels, lifetimes and radiative rates

excited state	$J$	energies( 1000.0 $\text{cm}^{-1}$ )	lifetime(s)	radiative rates( $\text{s}^{-1}$ )
$1s^1 2s^2 2p^1 P$	0.0	24807.122	$7.200 \times 10^{75}$	$0.000 \times 10^0$
$1s^1 2s^2 2p^1 P$	1.0	24815.141	$6.688 \times 10^{-13}$	$4.486 \times 10^{12}$
$1s^1 2s^2 2p^1 P$	2.0	24836.299	$7.200 \times 10^{75}$	$0.000 \times 10^0$
$1s^1 2s^2 2p^1 P$	1.0	24927.665	$1.016 \times 10^{-14}$	$2.952 \times 10^{14}$
$1s^1 2s^2 3p^1 P$	0.0	28844.181	$3.309 \times 10^{-10}$	$3.022 \times 10^9$
$1s^1 2s^2 3p^1 P$	1.0	28846.312	$2.079 \times 10^{-12}$	$1.446 \times 10^{12}$
$1s^1 2s^2 3p^1 P$	2.0	28852.031	$3.200 \times 10^{-10}$	$1.563 \times 10^{10}$
$1s^1 2s^2 3p^1 P$	1.0	28874.972	$3.592 \times 10^{-14}$	$8.352 \times 10^{13}$
$1s^1 2s^2 4p^1 P$	0.0	30149.146	$6.352 \times 10^{-12}$	$1.574 \times 10^{11}$

excited state	$J$	energies( 1000. 0 $\text{cm}^{-1}$ )	lifetime(s)	radiative rates( $\text{s}^{-1}$ )
$1s^1 2s^2 4p^1 \text{ } ^1\text{P}$	1. 0	30150. 017	$2. 948 \times 10^{-12}$	$1. 018 \times 10^{12}$
$1s^1 2s^2 4p^1 \text{ } ^1\text{P}$	2. 0	30152. 364	$6. 308 \times 10^{-12}$	$7. 926 \times 10^{12}$
$1s^1 2s^2 4p^1 \text{ } ^1\text{P}$	1. 0	30161. 636	$9. 567 \times 10^{-14}$	$3. 136 \times 10^{13}$

## 5 类 Be 氩离子内壳层电子激发光谱及振子强度

表 2 给出类 Be 氩离子内壳层电子激发光谱及振子强度,  $J$  为总角动量, 波长单位为 nm。偶宇称组态  $1s^2 2s^2$ 、 $1s^1 2s^2 3s^1$ 、 $1s^1 2s^1 2p^2$  和奇宇称组态  $1s^1 2s^2 2p^1$ 、 $1s^1 2s^2 3p^1$ 、 $1s^1 2s^2 4p^1$  形成的各原子态之间的跃迁共产生 165 条光谱线, 表 2 列出的是部分谱线, 绝大多数是谱线强度较大的波长。

Table 2. Be-like Ar ions inner shell excited electron spectra and oscillator strength

upper states	$J$	lower statets	$J$	wavelength (nm)	oscillator strength
$1s^1 2s^2 3p^1 \text{ } ^1\text{P}$	0. 0	$1s^1 2s^2 3s^1 \text{ } ^1\text{S}$	1. 0	107. 811	0. 0600
$1s^1 2s^2 3p^1 \text{ } ^1\text{P}$	1. 0	$1s^1 2s^2 3s^1 \text{ } ^1\text{S}$	1. 0	105. 390	0. 1811
$1s^1 2s^2 3p^1 \text{ } ^1\text{P}$	2. 0	$1s^1 2s^2 3s^1 \text{ } ^1\text{S}$	1. 0	99. 3987	0. 3256
$1s^1 2s^2 2p^1 \text{ } ^1\text{P}$	2. 0	$1s^1 2s^1 2p^2 \text{ } ^2\text{D}$	1. 0	41. 5699	0. 0000
$1s^1 2s^2 2p^1 \text{ } ^1\text{P}$	2. 0	$1s^1 2s^1 2p^2 \text{ } ^2\text{D}$	2. 0	40. 9789	0. 0091
$1s^1 2s^2 2p^1 \text{ } ^1\text{P}$	2. 0	$1s^1 2s^1 2p^2 \text{ } ^2\text{D}$	3. 0	40. 0932	0. 1754
$1s^1 2s^2 2p^1 \text{ } ^1\text{P}$	2. 0	$1s^1 2s^1 2p^2 \text{ } ^2\text{D}$	1. 0	39. 6606	0. 0014
$1s^1 2s^2 2p^1 \text{ } ^1\text{P}$	1. 0	$1s^1 2s^1 2p^2 \text{ } ^2\text{P}$	0. 0	38. 7484	0. 0006
$1s^1 2s^2 2p^1 \text{ } ^1\text{P}$	1. 0	$1s^1 2s^1 2p^2 \text{ } ^2\text{D}$	1. 0	38. 2092	0. 0044
$1s^1 2s^2 2p^1 \text{ } ^1\text{P}$	2. 0	$1s^1 2s^1 2p^2 \text{ } ^2\text{P}$	2. 0	37. 8233	0. 0193
$1s^1 2s^2 2p^1 \text{ } ^1\text{P}$	1. 0	$1s^1 2s^1 2p^2 \text{ } ^2\text{D}$	2. 0	37. 7094	0. 0987
$1s^1 2s^2 2p^1 \text{ } ^1\text{P}$	0. 0	$1s^1 2s^1 2p^2 \text{ } ^2\text{D}$	1. 0	37. 0733	0. 0299
$1s^1 2s^2 2p^1 \text{ } ^1\text{P}$	1. 0	$1s^1 2s^1 2p^2 \text{ } ^2\text{D}$	1. 0	36. 5902	0. 0289
$1s^1 2s^2 2p^1 \text{ } ^1\text{P}$	0. 0	$1s^1 2s^1 2p^2 \text{ } ^2\text{D}$	1. 0	35. 5472	0. 0235
$1s^1 2s^2 2p^1 \text{ } ^1\text{P}$	1. 0	$1s^1 2s^1 2p^2 \text{ } ^2\text{P}$	2. 0	35. 0207	0. 0140
$1s^1 2s^2 2p^1 \text{ } ^1\text{P}$	1. 0	$1s^1 2s^1 2p^2 \text{ } ^2\text{D}$	2. 0	34. 0338	0. 1080
$1s^1 2s^2 2p^1 \text{ } ^1\text{P}$	1. 0	$1s^1 2s^1 2p^2 \text{ } ^2\text{P}$	1. 0	25. 5926	0. 3516
$1s^1 2s^2 2p^1 \text{ } ^1\text{P}$	2. 0	$1s^1 2s^1 2p^2 \text{ } ^2\text{P}$	1. 0	25. 4075	0. 1949
$1s^1 2s^2 2p^1 \text{ } ^1\text{P}$	1. 0	$1s^1 2s^1 2p^2 \text{ } ^2\text{P}$	0. 0	24. 8782	0. 1188
$1s^1 2s^2 2p^1 \text{ } ^1\text{P}$	1. 0	$1s^1 2s^1 2p^2 \text{ } ^2\text{S}$	0. 0	24. 7468	0. 0420
$1s^1 2s^2 2p^1 \text{ } ^1\text{P}$	2. 0	$1s^1 2s^1 2p^2 \text{ } ^2\text{P}$	2. 0	24. 4151	0. 3815
$1s^1 2s^2 2p^1 \text{ } ^1\text{P}$	1. 0	$1s^1 2s^1 2p^2 \text{ } ^2\text{P}$	1. 0	24. 1114	0. 0613
$1s^1 2s^2 2p^1 \text{ } ^1\text{P}$	0. 0	$1s^1 2s^1 2p^2 \text{ } ^2\text{P}$	1. 0	23. 6540	0. 0884
$1s^1 2s^2 2p^1 \text{ } ^1\text{P}$	1. 0	$1s^1 2s^1 2p^2 \text{ } ^2\text{P}$	2. 0	23. 2158	0. 0984
$1s^1 2s^2 4p^1 \text{ } ^1\text{P}$	1. 0	$1s^1 2s^2 3s^1 \text{ } ^1\text{S}$	0. 0	7. 2611	0. 3273
$1s^1 2s^2 4p^1 \text{ } ^1\text{P}$	0. 0	$1s^1 2s^2 3s^1 \text{ } ^1\text{S}$	1. 0	7. 1545	0. 1203
$1s^1 2s^2 4p^1 \text{ } ^1\text{P}$	1. 0	$1s^1 2s^2 3s^1 \text{ } ^1\text{S}$	1. 0	7. 1501	0. 3548
$1s^1 2s^2 4p^1 \text{ } ^1\text{P}$	2. 0	$1s^1 2s^2 3s^1 \text{ } ^1\text{S}$	1. 0	7. 1381	0. 6028
$1s^1 2s^2 3p^1 \text{ } ^1\text{P}$	1. 0	$1s^1 2s^1 2p^2 \text{ } ^2\text{S}$	0. 0	2. 8223	0. 0004
$1s^1 2s^2 3p^1 \text{ } ^1\text{P}$	1. 0	$1s^1 2s^1 2p^2 \text{ } ^2\text{P}$	1. 0	2. 8117	0. 0003

upper states	$J$	lower states	$J$	wavelength (nm)	oscillator strength
$1s^1 2s^2 3p^1 P$	1.0	$1s^1 2s^1 2p^2 D$	2.0	2.7371	0.0001
$1s^1 2s^2 3p^1 P$	0.0	$1s^1 2s^1 2p^2 S$	1.0	2.7328	0.0003
$1s^1 2s^2 3p^1 P$	1.0	$1s^1 2s^1 2p^2 S$	1.0	2.7312	0.0008
$1s^1 2s^2 3p^1 P$	2.0	$1s^1 2s^1 2p^2 S$	1.0	2.7270	0.0012
$1s^1 2s^2 2p^1 P$	1.0	$1s^1 2s^2 3s^1 S$	0.0	2.5928	0.0673
$1s^1 2s^2 2p^1 P$	2.0	$1s^1 2s^2 3s^1 S$	1.0	2.5542	0.0915
$1s^1 2s^2 2p^1 P$	1.0	$1s^1 2s^2 3s^1 S$	1.0	2.5405	0.0544
$1s^1 2s^2 2p^1 P$	0.0	$1s^1 2s^2 3s^1 S$	1.0	2.5353	0.0185
$1s^1 2s^2 2p^1 P$	1.0	$1s^2 2s^2 S$	0.0	0.4012	0.7121
$1s^1 2s^2 3p^1 P$	1.0	$1s^2 2s^2 S$	0.0	0.3463	0.1502
$1s^1 2s^2 3p^1 P$	1.0	$1s^2 2s^2 S$	0.0	0.3315	0.0510

## 参 考 文 献

- [1] R. B. Vrijen, L. D. Noordam, Rydberg X-ray laser based on inner-electron optical-field ionization. *J. Opt. Sec. Am. (B)*, 1996, **13**(1) : 189~ 196
- [2] D. Cubaynes, S. Diehl, L. Journel *et. al.*, First photoexcitation measurements and R-matrix calculations of even-parity hollow states in laser-excited lithium atoms. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, **77**(11) : 2194 ~ 2197

## Photoionization of Be-Like Ar Ion Inner Shell Electron

Jin Shiqi Xu Zhizhan

(Laboratory for High Intensity Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,  
The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

(Received 29 November 1996; revised 21 February 1997)

**Abstract** The photoionization of Be-like Ar ion inner shell electron is studied. We have calculated its high levels, radiation life time, radiation rate, wavelength and oscillator strength as well as the “water window” wavelength.

**Key words** photoionization, timelife, radiation rate, strength intensity.