

α 粒子激励下氩激发态光谱

叶安培 朱正和 苟清泉 谭明亮 金行星 傅依备
(成都科技大学原子分子物理研究所, 成都 610065)

提 要

用自制的单光子计数系统, 测定了氩在 α 粒子激励下的发射光谱. 在 300~600 nm 范围, 认证得到 4 条 Ar I, 24 条 Ar II 和 1 条 Ar III 谱线. 实验研究了谱线强度随气体压强的变化规律. 经初步统计分析, 提出在 472.8 nm, 487.9 nm 等谱线上实现核泵浦激光振荡的可能性.

关键词 核激励, 氩光谱, 激光谱线.

1 引 言

第一次激光振荡演示成功不久, 人们就提出了激光的核能激发思想^[1]. 早在 1968 年美国 Northrop 空间实验室就开始进行核泵浦激光器的研究^[2]. 然而, 发光介质的核能激励是与电激励完全不同的新的泵浦方式, 它对发光介质的要求(如气体的压强等)以及所获得的谱线和可能实现的激光谱线也不尽相同^[10]. 本文利用放射源 ^{238}Pu 放出的高能 α 粒子(约 5.5 MeV)为激励源, 模拟反应堆泵浦机制, 在国内首次对 Ar 的核激励光谱进行了测量, 目的在于通过对 Ar^+ 离子核激励光谱的分析来寻找 Ar^+ 的核泵浦激光谱线.

2 实验方法与结果

^{238}Pu 放出的 α 粒子可使氩原子激发或电离激发, 这样就可测得氩原子光谱和一定电离态的离子光谱. 由于本实验所用的 α 粒子源较弱, 体系的发光强度低, 故采用灵敏度较高的单光子计数法进行测量. 利用 WDG500-1A 型单色仪, R585 型光电倍增管, FH1007 型单道, FH1002 型线性放大器, 以及计算机, X-Y 绘图仪等设计安装了一套单光子计数系统, 如图 1

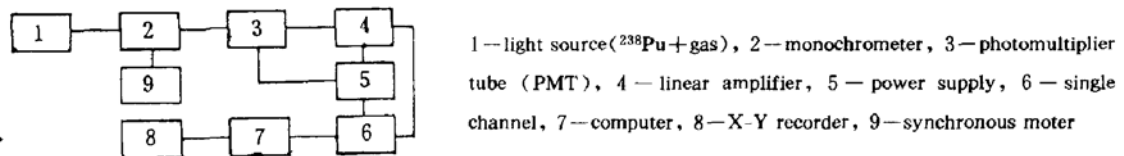


Fig. 1 Single-photon counting system for the measurement of spectra of some gases excited by α -particles emitted from ^{238}Pu .

所示. 其中, 单色仪的一级光栅范围为 200~600 nm, 分辨极限为 0.1 nm, 光电倍增管的波长

响应范围为 160~650 nm. 实验中, 系统本底计数为 25~30 photon/min. ^{238}Pu 的源强为 13.6 mCi, 氩气纯度为 99.999%, 每一波长值的光子计数时间为 60 sec.

用单光子计数系统对 48388 Pa 压强下氩在 300~600 nm 范围内的发射光谱进行了测量, 绘出的光谱图见图 2.

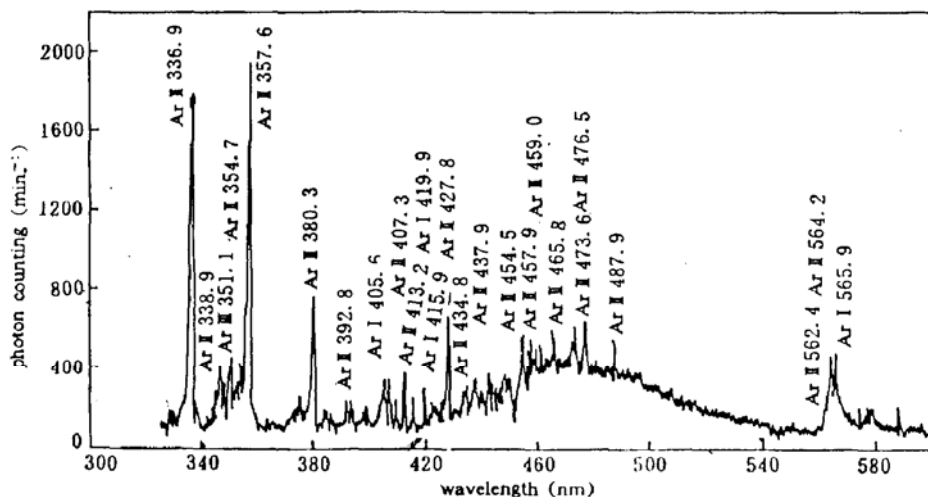


Fig. 2 The spectrum of argon excited by α -particles. The radioactive intensity of ^{238}Pu is 13.6 mci, the energy of α -particle is about 5.5 MeV, the counting time is 60 second for each wavelength, and the pressure of argon is 48388 Pa

测得的谱线经分析认证得到 4 条 Ar I, 24 条 Ar II 和 1 条 Ar III 谱线. 各谱线的波长, 相对强度, 以及对应的能级跃迁列于表 1. 其中, 波长计算值是我们根据 Moore 能级表^[3]计算得到的.

为了分析气体压强对谱线强度的影响, 实验测量了 83046 Pa, 71982 Pa, 57586 Pa, 48388 Pa, 28660 Pa, 16396 Pa 和 8265 Pa 七种不同压强下若干谱线的强度, 得到了谱线强度随气体压强的变化曲线, 如图 3 所示. 其中, 460.9 nm, 454.5 nm 和 457.9 nm 为 Ar II 谱线, 419.9 nm 和 415.9 nm 为 Ar I 谱线, 351.1 nm 为 Ar III 谱线.

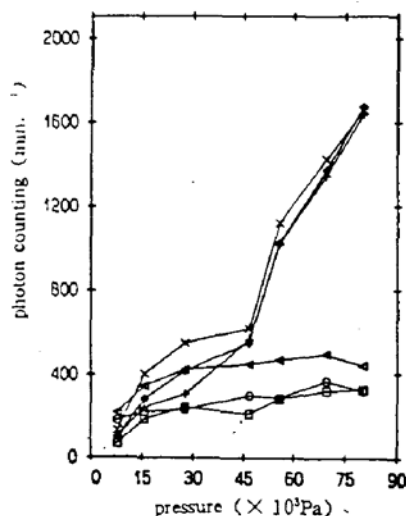


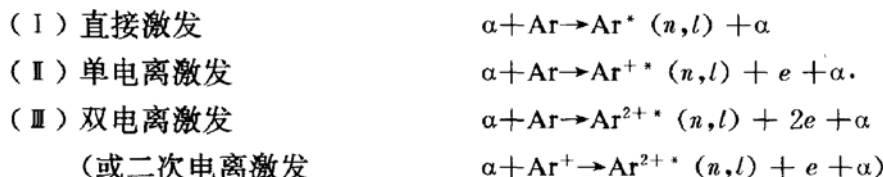
Fig. 3 The variation of the intensity with the pressure of Ar

□ Ar I 415.9 nm, ○ Ar I 419.9 nm, △ Ar III 351.1 nm, + Ar II 457.9 nm, × Ar II 454.5 nm, ◇ Ar II 460.9 nm

3 分析讨论

3.1 氩谱线及其随气体压强的变化

实验表明氩在 α 粒子激励下主要存在下列激发过程:



其中单电离激发是主要过程. 这是由于 α 粒子的电离能力较强, 当它与氩原子碰撞时, 大多数

氩原子被电离掉一个电子并被激发,只有少数被直接激发,极少数的氩原子也可能被双电离激发,或二次电离激发.

Table 1 The spectral lines of argon excited by α -particles

| No. | ele- ments | obs. (nm) | relative intensity | transition | calcu. (nm) | ref. [4] | ref. [11] | ref. [12] | ref. [13] |
|-----|---------------|--------------|-----------------------|---|----------------|-----------------|-----------|-----------|-----------|
| 1 | Ar II | 313.8 | 276 | $4d^2P_{3/2} \rightarrow 4p^2D_{3/2}^0$ | 313.84 | 313.763 | 313.902 | | |
| 2 | Ar II | 336.9 | 816 | $4f[3]_{3/2} \rightarrow 3d''^2D_{3/2}$ | 337.16 | 337.093 | 337.097 | | |
| 3 | Ar II | 338.9 | 236 | $4d^2P_{3/2} \rightarrow 4p^2S_{3/2}^0$ | 338.94 | 338.853 | 338.854 | | |
| 4 | Ar III | 351.1* | 440 | $4p^3P_2 \rightarrow 4s^3S_1^0$ | 351.21 | 350.933-351.418 | | | 351.11 |
| 5 | Ar II | 354.7 | 417 | $4d' ^2G_{7/2} \rightarrow 4p' ^2F_{7/2}$ | 354.68 | 354.584 | 354.584 | | |
| 6 | Ar II | 357.6* | 751 | $4d^4F_{7/2} \rightarrow 4p^4D_{7/2}^0$ | 357.76 | 346.634-358.845 | 357.662 | | 357.76(a) |
| | | | | $5d^4F_{7/2} \rightarrow 4p' ^2D_{7/2}^0$ | 357.67 | 367.69 | | | 357.69 |
| 7 | Ar II | 380.3 | 444 | $4d' ^2D_{3/2} \rightarrow 4p' ^2D_{3/2}^0$ | 380.42 | 380.317 | 380.319 | | |
| 8 | Ar II | 392.8 | 178 | $4p^4S_{3/2} \rightarrow 4s^4P_{3/2}$ | 392.97 | 392.863 | 392.862 | | |
| 9 | Ar I | 405.6 | 301 | $5p' [3/2]_1 \rightarrow 4s [3/2]_1^0$ | 405.56 | 405.453 | 405.453 | | |
| 10 | Ar II | 407.3 | 403 | $5s''^2S_{1/2} \rightarrow 5p^2P_{1/2}^0$ | 407.19 | 407.079 | 407.201 | | |
| 11 | Ar II | 413.2 | 471 | $4p' ^2P_{3/2}^0 \rightarrow 4s' ^2D_{3/2}$ | 413.28 | 413.173 | 413.173 | | |
| 12 | Ar I | 415.9 | 324 | $5p [3/2]_2 \rightarrow 4s [3/2]_2^0$ | 415.97 | 415.859 | 415.859 | | |
| 13 | Ar I | 419.9 | 318 | $5p [1/2]_0 \rightarrow 4s [3/2]_1^0$ | 419.95 | 419.832 | 419.832 | | |
| 14 | Ar II | 427.8 | 905 | $4p' ^2P_{3/2}^0 \rightarrow 4s' ^2D_{3/2}$ | 427.87 | 427.752 | 427.755 | | |
| 15 | Ar II | 434.8 | 649 | $4p^4D_{3/2}^0 \rightarrow 4s^4P_{3/2}$ | 434.92 | 417.837-443.019 | 434.811 | 434.8 | |
| 16 | Ar I | 437.9 | 746 | $5s^2P_{1/2} \rightarrow 4p^2S_{1/2}^0$ | 438.11 | 437.988 | 437.974 | | |
| 17 | Ar I | 454.5* | 1659 | $4p^2P_{3/2}^0 \rightarrow 4s^2P_{3/2}$ | 454.63 | 454.505 | 454.508 | | 454.50 |
| 18 | Ar I | 457.9* | 1640 | $4p^2S_{1/2}^0 \rightarrow 4s^2P_{1/2}$ | 458.06 | 457.935 | 457.939 | | 457.94 |
| 19 | Ar I | 459.0 | 1582 | $4p' ^2P_{3/2}^0 \rightarrow 4s' ^2D_{3/2}$ | 459.11 | 458.990 | 458.993 | | |
| 20 | Ar I | 460.9* | 1674 | $4p' ^2P_{1/2}^0 \rightarrow 4s' ^2D_{3/2}$ | 461.08 | 463.723-458.990 | 460.960 | 461.0 | 460.96 |
| 21 | Ar I | 465.8* | 1744 | $4p^2P_{3/2}^0 \rightarrow 4s^2P_{3/2}$ | 465.92 | 454.5-488.903 | 465.794 | | 465.79 |
| 22 | Ar I | 472.8* | 1907 | $4p^2D_{3/2}^0 \rightarrow 4s^2P_{3/2}$ | 472.81 | 472.686 | 472.691 | | 472.69 |
| 23 | Ar II | 473.6 | 1753 | $4p^4P_{3/2}^0 \rightarrow 4s^4P_{3/2}$ | 473.72 | 473.591 | 473.593 | | |
| 24 | Ar II | 476.5* | 2060 | $4p^2P_{3/2}^0 \rightarrow 4s^4P_{1/2}$ | 476.61 | 476.49 | 476.489 | 476.5 | 475.49 |
| 25 | Ar II | 487.9* | 1771 | $4p^2D_{3/2}^0 \rightarrow 4s^2P_{3/2}$ | 488.12 | 472.856-496.507 | 487.990 | 488.0 | 487.99 |
| 26 | Ar II | 562.4 | 245 | $5P^4D_{3/2} \rightarrow 3d' ^2D_{3/2}$ | 562.72 | 562.568 | 562.378 | | |
| 27 | Ar II | 564.2 | 321 | $4P^2S_{1/2}^0 \rightarrow 3d^4F_{3/2}$ | 564.39 | 593.911 | 564.134 | | 564.24(b) |
| | Ar I | | | $9s [3/2]_1^0 \rightarrow 4p [1/2]_0$ | 564.06 | | | | |
| 28 | Ar I | 565.9 | 276 | $7d [1/2]_1^0 \rightarrow 4p' [3/2]_1$ | 566.36 | 566.200 | 565.913 | | |
| 29 | Ar I | 614.0 | 2484 | $4d^2P_{3/2} \rightarrow 4p' ^2F_{3/2}$ | 614.03 | 613.866(?) | | | |

notes: The counting time is 60 second for each wavelength; "*" laser lines by electron impact excitation; [a] see ref. [5] [b] see ref. [6]

从图 3 可知,谱线的强度随气体压强升高而增大,且 Ar II 谱线的强度比 Ar I 和 Ar III 的增大快得多.此现象可用 Walters 提出的简化的能级模型^[9]得以解释.考虑到氩的能级差一般较大,忽略能级间的转移激发,则 K 能级上的粒子数密度的变化率可表示为

$$\frac{dN_K}{dt} = f_K P - \sum_i A_{Ki} N_K - C_K N_K P \quad (1)$$

式中 N_K 为 K 能级上的粒子数密度, f_K 和 C_K 分别为单位压强下 K 能级上的粒子数生成率和碰撞退激发速率常数, P 为气体压强, A_K 为自发辐射系数. 达到定态时, $\frac{dN_K}{dt} = 0$, 则

$$N_K = \frac{f_K P}{C_K P + \sum_i A_{Ki}} = \frac{f_K}{C_K + \sum_i A_{Ki}/P} \quad (2)$$

单位时间单位体积内从 K 能级自发跃迁到 i 能级的原子(或离子)所辐射出的光子数为

$$I_{Ki} = A_{Ki}N_K = \frac{A_{Ki}f_K}{C_K + \sum_i' A_{Ki}/P} \quad (3)$$

$$(3) \text{式对 } P \text{ 求导得: } \frac{dI_{Ki}}{dP} = \frac{A_{Ki}f_K \sum_i' A_{Ki}}{(C_K P + \sum_i' A_{Ki})^2} > 0 \quad (4)$$

由实验结果知, (II) 式激发截面比 (I)、(III) 两式的大得多, 故 $f_{Ar II} \gg f_{Ar I, Ar III}$. 同时, 图 2 中 Ar II 谱线的 A_{Ki} 值比 Ar I 和 Ar III 的 A_{Ki} 值大一个量级^[6~8]. 由此可以说明谱线的强度(即光子计数率)随气体压强升高而增大, 且 Ar II 谱线强度比 Ar I 和 Ar III 的增大快得多.

3.2 核泵浦激光谱线的可能性分析

粒子数反转是产生激光的必要条件. 它可以通过选择激发或上能级寿命比下能级寿命长得多的有利条件来实现. 在 Ar^+ 离子系统中, 虽没有明显的选择激发, 但存在十分有利的寿命比. 譬如, Ar II 的 487.9 nm 谱线, 用延迟符合法测得的上能级寿命 $\tau_1(4p^2D_{3/2}^0) = 9.0 \times 10^{-9} s^{[6]}$, 基于经典计算预期的下能级寿命 $\tau_2(4s^2P_{3/2}) = 3.0 \times 10^{-10} s^{[14]}$, $\tau_1/\tau_2 = 30$. 另一方面, 本实验所涉及的 Ar II 谱线的下能级比中性氩原子基态能级高很多(≥ 33 eV), 热激发可以忽略, Ar^+ 的激发完全由 α 粒子碰撞产生. 这些激发态能级上的粒子数完全有可能偏离热平衡态时的分布, 它们之间实现粒子数反转是很有可能的. 关于这一点可用统计方法来说明.

若系统处于平衡或局部热平衡态, 则受激粒子(Ar^+ 离子)应满足玻尔兹曼分布

$$N_K = \frac{N_0 g_K}{Z(T)} \exp(-E_K/KT) \quad (5)$$

式中 N_0 为总的粒子数密度, N_K, g_K 和 E_K 分别为 K 能级的粒子数密度, 简并度和能量, K 为玻尔兹曼常数, T 为绝对温度, $Z(T)$ 为绝对温度的某一函数. 自发辐射的跃迁速率 I_{Ki} 为

$$I_{Ki} = A_{Ki}N_K = \frac{A_{Ki}N_0 g_K}{Z(T)} \exp(-E_K/KT) \quad (6)$$

$$\text{上式变形得: } \ln\left(\frac{I_{Ki}}{g_K A_{Ki}}\right) = \ln\left(\frac{N_0}{Z(T)}\right) - E_K/KT = C(T) - E_K/KT \quad (7)$$

其中, 对一定的温度 T , $C(T) = \ln[(N_0/Z(T))]$ 为一常数. 在 (7) 式中, 若以 E_K 为自变量, 以 $\ln(I_{Ki}/g_K A_{Ki})$ 为函数, 作出所谓的玻尔兹曼图, 则所有的谱线都应落到斜率为 $-1/(KT)$ 的直线上. 图 4 是根据实验数据作出的玻尔兹曼图. 图中“*”为实测值, A_{Ki} 可从文献^[6~8]查得, 直线由实验值拟合得到.

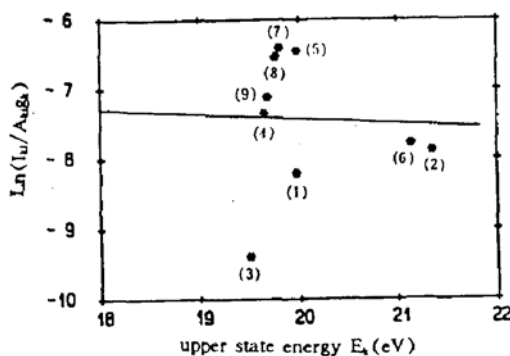


Fig. 4 Boltzmann plot of Ar II

“*” experiment value at 48388 Pa.

(1) 392.8 nm, (2) 427.8 nm

(3) 434.8 nm, (4) 437.9 nm

(5) 457.9 nm, (6) 460.9 nm

(7) 465.8 nm, (8) 472.8 nm

(9) 487.9 nm

从图 4 中可以看出, 实际上 Ar^+ 离子激发态能级上的粒子数并不遵从平衡态时的玻尔兹曼分布, 有些能级上粒子数多于平衡时分布, 有些少于平衡时分布, 其中 465.8 nm, 457.9 nm, 472.8 nm, 487.9 nm 四条谱线对应上能级的粒子数均多于平衡态分布. 值得指出的是,

这四条谱线都是电激励下的主要激光谱线. 因此, 它们对应的上下能级之间很有可能实现粒子数反转, 成为核激励下的激光谱线.

参 考 文 献

- [1] K. Thom, R. T. Shneider, Nuclear pumped gas lasers. *AIAA Journal*, 1972, (10): 400~406
- [2] J. R. Rusk, Research on direct nuclear pumping of gas laser. *AFAL-TR*, 1968: 68~256
- [3] C. E. Moore, *Atomic Energy Levels*. Vol. 1, Reprint of NBS Circular 467, Washington D. C., 1971: 211~213
- [4] S. Bashkin, Jr. J. O. Stoner, *Atomic energy levels and gortrian diagrams*. Vol. 1, North-Holland, Amsterdam, 1978: 166~229
- [5] D. Zhecher, Self-alignment radiative lifetime measurements of some Ar II levels in a hollow-cathode discharge. *J. Phys. (B)*, 1985, 18(1): 65~70
- [6] Gustavo Garcia, Jose Campos, Lifetimes and Transition Probabilities of Ar I. *J. Quant Spectrosc. Radiat. Transfer*, 1985, 34(1): 87
- [7] A. Abbas, T. S. Brsha, Z. A. Abdel, Half-width, shift and transition probability of Ar II lines. *Japanses J. Appl. Phys.* 1988, 27(5): 804~807
- [8] F. J. Coetzer, T. C. Kotze, P. Vander Westhuizen, Cascade corrected lifetimes of the 4p ⁴D₅ excited states in Ar II using the beam-foil technique. *J. Quant Spectrosc. Radiat. Transfer*, 1988, 39(3): 181~188
- [9] R. A. Walters, Excitation and ionization of gases by fission fragments. PhD dissertation, University of Florida, 1973
- [10] 黄 整, 傅依备, 金行星等, α 粒子激励 Ne 光谱测量. *原子分子物理学报*, 1990, 7(3): 1496~1503
- [11] 光谱线波长表. 北京: 中国工业出版社, 1971: 619~622
- [12] 雷子明, 杨 峰, 刘家瑞等, 双电荷离子 He²⁺ 与 Ne, Ar 原子碰撞中的激发态. *物理学报*, 1988, 37(8): 1244~1253
- [13] 饭田修一, 大野和郎, 神箭熙等著, 曲长芝译, *物理学常用数表(第二版)*. 北京: 科学出版社, 1987: 174~178
- [14] A. 科尼著, 邱元武, 韩全生, 张绮秀译, *原子光谱和激光光谱学*, 北京: 科学出版社, 1984: 290

The excited state spectra of argon by alpha-particle impact excitation

YE Anpei ZHU Zhenghe GOU Qinquan TAN Mingliang
JIN Xingxing FU Yibei

(*Institute of Atomic and Molecular Physics, Chengdu University of Science and Technology, Chengdu 610065*)

(Received 19 June 1992; revised 13 August 1992)

Abstract

The spectra of argon excited by alpha-particles with about 5.5 MeV emitted from ²³⁸Pu have been measured by using a home made single-photon counting system consisting of a monochromator, photomultiplier tube (PMT) and single channel ect. . Twenty-nine spectral lines between 300~600 nm are successfully identified. The variation of the intensity of some lines with argon pressure is given. The lines of 472.8 nm, 487.9 nm ect. would be possible nuclear pumped laser lines in consideration of a simplified population analysis.

Key words nuclear pump, argon spectra, laser lines.