

纯氩空心阴极放电中 Ar^+ $4p-4s$ 态的粒子数反转

李世芳 胡企铨 殷立峰 林福成
(中国科学院上海光学精密机械研究所)

提 要

本文报道利用激光感生荧光测量方法在纯氩直流空心阴极放电(HCD)中探测到 Ar^+ $4p-4s$ 态间存在粒子数反转, 给出了实验数据, 并作了相应解释。

对正柱放电氩离子激光器的反转机理早已进行了理论和实验的研究^[1], 但这些研究大都是在高电流和高电子温度情况下进行的。Rózsa 和 Solanki 等也曾有过 He-Ar 空心阴极离子激光器的报道^[2,3]。我们过去利用脉冲激光感生荧光的方法研究了 Ne 空心阴极放电中 $1s_2-2p$ 态间粒子数能否反转的问题^[4]。本文报道在连续激光激励条件下纯 Ar 直流空心阴极放电(HCD)中获得 Ar^+ 谱的负感生荧光信号, 首次报道了 Ar^+ 的 $4p-4s$ 态间的粒子数反转情况, 并对其形成的机理作了初步探讨。

一、实验装置

图1给出了我们所用的实验装置框图。连续 Ar^+ 激光器输出功率约为 4W, 其中主要

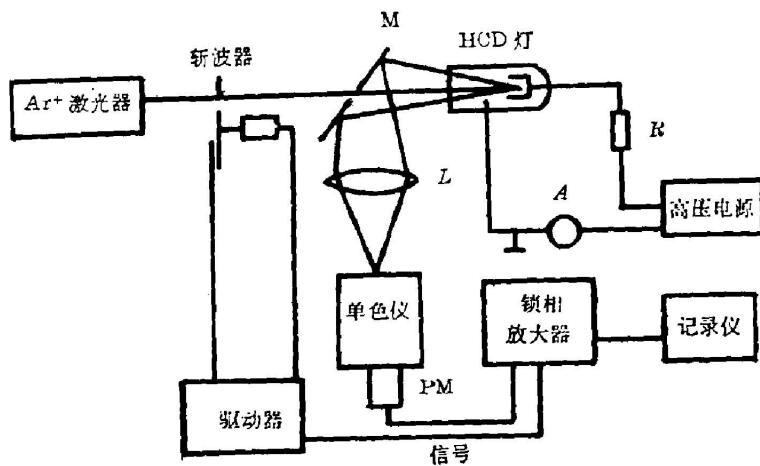


Fig. 1 Experimental setup

收稿日期: 1985年2月17日; 收到修改稿日期: 1985年3月28日

的四条谱线波长为: 476.5 nm、496.5 nm、488.0 nm、514.5 nm, 它们的输出功率之比为 1:3:3.3:3.9。线宽均约 1 GHz, 它经 127 Hz 斩波后射入 HCD 灯*中。灯中充有约 3 Torr 的纯 Ar, 阴极孔直径约 4 mm, 有效长度为 10 mm。HCD 灯发射的荧光经反射镜 M 反射后, 由透镜 L 聚焦在 WDG 500 型光栅单色仪的狭缝上, 经单色仪色散后, 由光电倍增管 PM 接收, 送入锁相放大器放大。放大后的信号由记录仪记录。整个接收系统的光谱响应已经用标准钨带灯校定过了。

二、结果和讨论

1. 感生荧光谱线

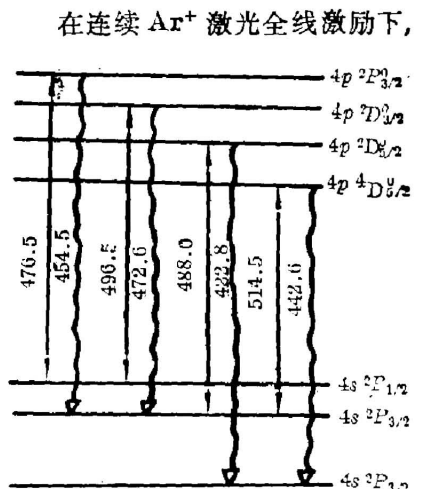


Fig. 2 Transitions of excitation laser (straight line) and transitions of laser-induced fluorescence (wavy line)

HCD 中 Ar^+ 的激光感生荧光谱。它们分别为 454.5 nm、472.6 nm、422.8 nm、442.6 nm 等四条感生荧光谱线, 其上能级分别对应于 Ar^+ 激光器的四条主要谱线 476.5 nm、496.5 nm、488.0 nm、514.5 nm 的上能级, 如图 2 所示。用单线激励进行验证表明, 它们确属感生荧光信号, 正如所预期那样, 它们都是属于这些上能级可能发射的谱线中 gA 数最大的^[3]。图 3 给出了这四条谱线附近的发射光谱图和感生荧光光谱图。由图 3 可见, 这四条谱线的感生荧光都是负信号, 表明在激光作用下, 这四条谱线的荧光发射强度都减小。这一点在 Ne 的非反转能级所作的类似实验中表明, 在共振激光作用下, 当能级间粒子数不反转时, 感生荧光是正信号^[4]。

我们还测量了 454.5 nm 和 472.6 nm 两条谱线的感生荧光强度随 HCD 灯放电电流的变化, 其结果如图 4 所示。作为比较, 图 5 中给出了 454.5 nm、472.6 nm、422.8 nm 和 442.6 nm 四条谱线的发射荧光强度随 HCD 灯放电电流的变化关系, 两者的变化规律基本上是一致的。

由于实验中测量到的感生荧光信号很小, 因此, 我们在实验中采用了较强的辐照激光功率和较大的灯放电电流。但是过强的辐照激光功率将产生一个较大的散射光背景信号, 图 3 (a)、(b) 中, 中间曲线是 $H_{\text{HCD}}=0$ 时, 由散射激光引起的背景噪声, 其中 454.5 nm 线后边一个上升峰是 Ar^+ 激光器 457.9 nm 的一条较弱的输出线。同时, 较大的放电电流(已达到或超过灯的最高额定电流值)将会引起灯的热不稳定性, 从而导致测量误差的增大。在实际的测量中必须选择合适的参数以获得较高的信噪比。

2. 共振能级间的速率方程

实验表明, 由于共振激光的作用, 从激光上能级发射的荧光强度变小, 它直接证明了相应共振能级间粒子数是反转的。

* 市售的 Ar-Zn 灯, 采用高压稳压电源供电以保证低噪音。

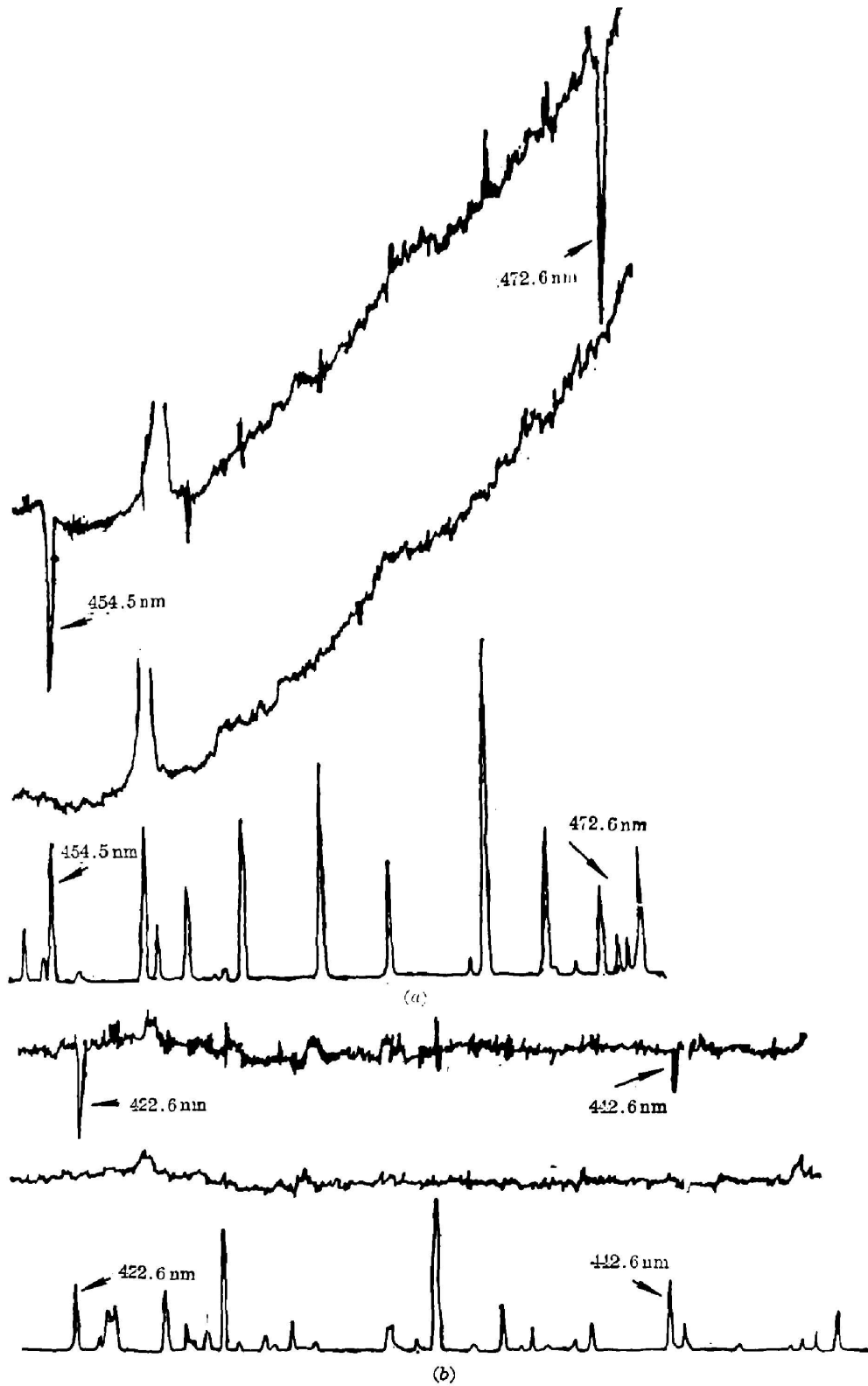


Fig. 3 Laser-induced fluorescence spectrum (a) and emission spectrum (b) of the Ar^+

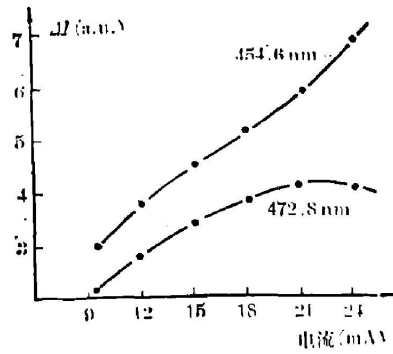


Fig. 4 Intensity of laser-induced fluorescence vs. current of HCD lamp

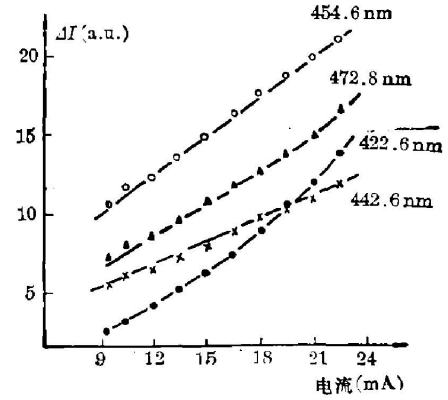


Fig. 5 Intensity of emission fluorescence I vs. current of HCD lamp

作为初步的分析, 考虑如图 6 所示的能级系统, 我们建立起感生荧光、发射荧光强度及其自发辐射系统和能级寿命间的关系式。设气体是光学稀疏的, 有速率方程:

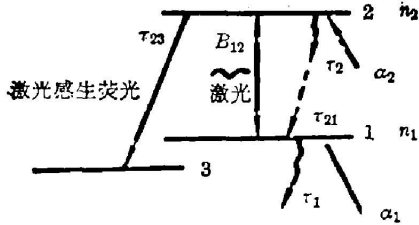


Fig. 6 Schematic diagram of energy levels illustrating laser-induced fluorescence

其自发辐射系统和能级寿命间的关系式。设气体是光学稀疏的, 有速率方程:

$$\left. \begin{aligned} (dn_1/dt) &= (n_2 - n_1)B_{12}P - (n_1/\tau_1) \\ &\quad + (n_2/\tau_{21}) - \alpha_1, \\ (dn_2/dt) &= -(n_2 - n_1)B_{12}P - (n_2/\tau_2) - \alpha_2, \end{aligned} \right\} (1)$$

式中 n_2 、 n_1 分别是激光共振上、下能级的粒子集居数, τ_2 、 τ_1 是相应能级的寿命, P 为激励激光功率, τ_{21} 是能级 2 到能级 1 的衰减时间常数, τ_2/τ_{21} 为分支比, B_{12} 为爱因斯坦系数, α_1 和 α_2 分别为能级 1、2 的碰撞激

发速率。当没有激光激励 ($P=0$) 时, 即稳态情况:

$$\left. \begin{aligned} n_{20} &= \alpha_2\tau_2, \\ n_{10} &= \alpha_1\tau_1 + (\tau_1\alpha_2\tau_2/\tau_{21})_0 \end{aligned} \right\} (2)$$

此时的自发发射荧光强度 I_{23} 为

$$I_{23} = C_I n_{20} / \tau_{23}, \quad (3)$$

式中的 C_I 是比例常数, 与探测系统等都有关系。在激光 P 作用下, 系统达到稳态后, 由方程 (1) 取稳态情况, 有:

$$\left. \begin{aligned} n_2 &= \frac{n_{20} + B_{12}P\{\tau_2 n_{10} + [1 - (\tau_2/\tau_{12})]\tau_1 n_{20}\}}{1 + B_{12}P\{\tau_2 + \tau_1[1 - (\tau_2/\tau_{12})]\}}, \\ \Delta n_2 = n_2 - n_{20} &= \frac{(n_{10} - n_{20})B_{12}P\tau_2}{1 + B_{12}P\{\tau_2 + \tau_1[1 - (\tau_2/\tau_{12})]\}} \end{aligned} \right\} (4)$$

激光感生荧光强度 ΔI_{23} 为

$$\Delta I_{23} = C_I \Delta n_2 / \tau_{23}, \quad (5)$$

将 (4) 式代入 (5) 式得

$$\Delta I_{23} = -C_I B_{12} P \tau_2 (n_{20} - n_{10}) / \tau_{23} \{1 + B_{12} P [\tau_1 + \tau_2 - (\tau_1 \tau_2 / \tau_{12})]\}_0. \quad (6)$$

由(6)式可知,当共振能级间粒子数反转时,即 $(n_{20} - n_{10}) > 0$, 则 $\Delta I_{23} < 0$; 而在粒子数不反转的情况下, $\Delta I_{23} > 0$ 。所以实验中探测到的负感生信号表明,相应共振能级间的粒子数是反转的。

3. 粒子数反转的机理

由于同一上能级的不同感生荧光谱 ΔI_{23} 与自发辐射强度 I_{23} 成正比,而 I_{23} 取决于 A_{23} 的大小。对 A_{23} ^[5,6] 值的分析及实测的 I_{23} 值都表明在我们所测量的频域及仪器灵敏度范围内,最可能探测到以上所示的四条感生荧光谱。

我们认为, HCD 中 Ar^+ 能级间粒子数反转的形成机理与正柱放电中的情况是类似的。由于 HCD 中特殊的电子能量分布 (HCD 中电子能量分布较正柱放电中的麦克斯威分布具有更多的高能电子) 和较高的电子密度^[7,8], 使具有较大的电子碰撞激发截面^[9]的 $\text{Ar}^+ 4p$ 和 $4s$ 组态主要通过电子碰撞激发形成。由于电子碰撞激发偏向于激发 $4p$ 态 Ar^+ 离子, 而 $4s$ 态激发速率较小^[9], 因而可以使 $\text{Ar}^+ 4p-4s$ 态间形成反转。

三、结 束 语

我们已经从实验中探测到了纯氩稳态直流 HCD 中 $\text{Ar}^+ 4p-4s$ 态间负的激光感生荧光信号, 这被解释为这组能态间粒子数形成了反转。这一结果表明有可能制作纯 Ar 空心阴极放电激光器。

参 考 文 献

- [1] Toshio Goto *et al.*; *IEEE J. Quant. Electron.*, 1971, **QE-7**, No. 11 (Dec), 555.
- [2] K. Rozsa *et al.*; *Opt. Commun.*, 1977, **23**, No. 1 (Oct), 15.
- [3] R. Solanki *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1979, **35**, No. 4 (Aug), 317.
- [4] 胡企铨、殷立峰等;《光学学报》, 1985, **5**, No. 8 (Aug), 673.
- [5] B. L. Rudko, C. L. Tang; *J. Appl. Phys.*, 1967, **38**, No. 12 (Nov), 4731.
- [6] Stats *et al.*; *J. Appl. Phys.*, 1965, **36**, No. 7 (Jul), 2278.
- [7] P. Gill, C. E. Webb; *J. Phys. (D): Appl. Phys.*, 1978, **11**, No. 3 (Feb), 245.
- [8] 成都电讯工程学院、北京工业大学编;《激光器件》, (湖南科学技术出版社, 1981), 第一章。
- [9] W. B. Bennett *et al.*; *Phys. Rev. Lett.*, 1966, **17**, No. 19 (7 Nov), 987.

**Population inversion between Ar⁺ 4p and 4s levels
in HCD of pure argon**

LI SHIFANG, HU QIQUAN, YIN LIFENG AND LIN FUCHENG
(*Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica*)

(Received 17 February 1985; revised 28 March 1985)

Abstract

Population inversion between Ar⁺ 4p and 4s levels was detected in the direct current hollow cathode discharge (HCD) of pure argon by laser-induced fluorescence measurement. Experimental data were obtained and analysed.