

低气压对称放电热管炉和铀的 双共振光电流光谱*

何懋麒 罗龙根
(复旦大学 物理系)

C.L.Cromer

(National Bureau of Standards U. S. A. Division 531)**

提 要

本文叙述了一种新型的低气压对称放电热管炉, 用它研究了铀原子不同气压下的双共振光电流光谱, 新观察到铀元素由 17341 cm^{-1} 能级出发的4条新谱线, 由 16612 cm^{-1} 能级出发的3条新谱线。实验证明这种热管炉比较适合于研究高 Z 金属元素的高激发态光谱。

关键词: 低压热管炉; 铀; 双共振光电流光谱。

一、引 言

近年来, 高 Z 元素高激发态已成为原子物理研究工作的前沿。高 Z 元素, 其外层电子结构十分复杂, 尤其是稀土元素, 电子未填满 $4f$ 、 $5d$ 壳层, 先填 $6s$ 、 $6p$ 等壳层, 耦合方式多变, 因而高能级十分密集, 致使高激发态光谱也十分复杂。如果我们研究的原子样品气压为 10 Torr 以上量级, 高能级粒子数将通过跃迁能级与其附近能级的碰撞而重新分布, 导致复杂的光谱更加复杂, 极难标识。在文献 [1] 中, 介绍了一种新型的充氙甚低气压直流放电管 ($1\text{ mTorr} \sim 100\text{ mTorr}$) 研究了氙的双共振光电流光谱, 当氙的气压低于 10 mTorr 时, 由于碰撞而引起的双共振光电流光谱消失, 仅仅保留了无碰撞双共振光电流光谱, 证明了低气压阳极对称放电管的确是研究气体原子高激发态光谱的有力工具。本文综合了这种电管和热管炉的优点, 使之适合于产生低压高 Z 金属蒸汽, 研究其高激发态。

二、实 验

如图 1 所示, 低压对称放电热管炉 (LPDP) 是在一般热管炉的中部对称地安装 6 根直径 1.5 mm 的细钨棒, 这些钨棒由不锈钢支架固定, 棒距中心 10 mm , 中间有通光小孔, 直径为 6 mm , 这 6 根钨棒与电源高压阳极相连, 不锈钢管壁为阴极, 紧贴管壁为不锈钢网, 两

收稿日期: 1989年7月31日; 收到修改稿日期: 1989年10月4日

* 本文是 1988 年武汉中国原子分子物理会议的录用论文。部分工作是作者何懋麒、C. L. Cromer 在美国国家标准局做的。

** 美国国家标准局 (NBS) 现已改名为美国国家标准与技术研究所 (NIST)。

冷端通水冷却, 靠近两冷端用石英管将阴极与阳极绝缘。样品为 99.99% 的纯铕(Eu)块, 炉管温度根据所需的金属蒸汽压控制, 例如温度在 $600^{\circ}\text{C}\sim 700^{\circ}\text{C}$, 铕蒸汽压在 $10\text{ mTorr}\sim 50\text{ mTorr}$, 流动氦气作为保护气体, 冷端总气压约 $30\text{ mTorr}\sim 140\text{ mTorr}$ 。加热时, 两冷端温度为室温, 约 300 K , 当炉子中部约为 900 K 时, 中部温度约为两冷端温度的 3 倍, 所以两冷端氦气密度约为中部混合气体(铕蒸汽与氦气)密度的 3 倍。由于石英管的绝缘, 尽管冷端气体密度为中部的 3 倍, 放电仍然维持在中部。

测量铕高激发态双共振光电流光谱(DROGS)的实验安排如图 2, 一台 10 W 多线 Ar^+ Laser 被 S_1 均分为两束, 一束泵浦 CR-599-01 宽带可调谐染料激光器 L_1 , L_1 腔中放一块 3 mm 厚不镀膜的标准具压缩染料激光线宽, 进一步提高泵浦效率, 稳定 L_1 的输出 λ_1 , λ_1 经频率 $f_1=1\text{ kHz}$ 的调制器后入射到样品池, 作为双共振激励的第一步。另一束泵浦一台 CR-699-01 染料激光器 L_2 , 输出 λ_2 经 $f_2=2\text{ kHz}$ 调制后, 与 λ_1 同向共轴地射入热管炉。用 R6G、DCM 染料, 在 $5600\text{ \AA}\sim 6900\text{ \AA}$ 波段内扫描, 作为双共振的第二步, S_2 分束进入 Eu-Ne 空心阴极灯, 通过示波器监视 λ_1 是否调到共振峰, 并通过 Lock-in 记录下 Ne 的单光子光谱作为铕光谱定标用。再由 S_3 从 λ_2 分束通过厚 30 mm 的标准具, 记录其透射曲线, 作为频标, 放电电流为 1 mA , 铕蒸汽辉光放电呈梅花形, (从管端看管内), 和频 (f_1+f_2) 讯号经电容 C 耦合, 带通放大器放大, 送入 Lock-in, 计算机通过 Lock-in 控制 L_2 扫描和采集 DROGS 讯号, 其结果如下。

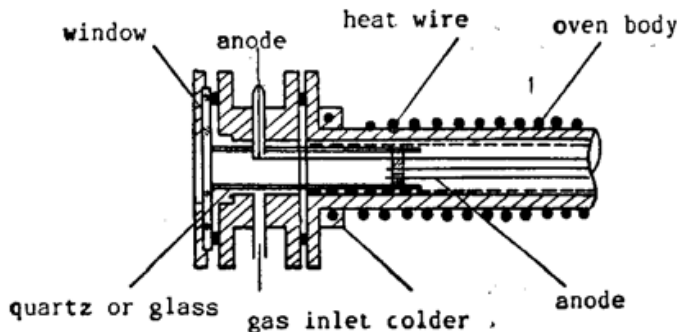


Fig. 1 Schematic of LPDP

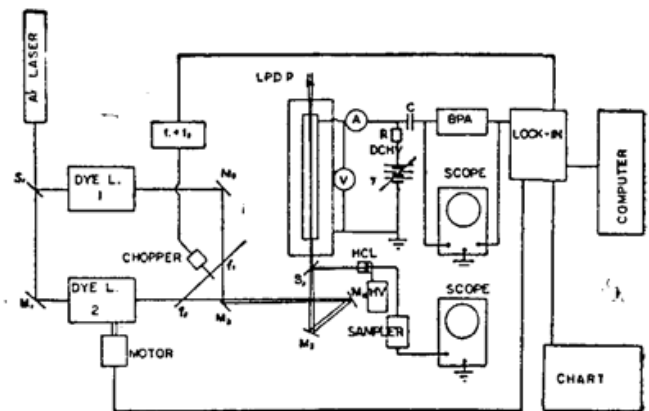


Fig. 2 Experimental setup of DROGS

三、结果和讨论

第一台激光 L_1 调到 5765 \AA , 相应的跃迁能级是基态 $4f^7 6s^2 8s_{7/2}^0 \rightarrow 4f^7 (8s^0) 6s6p (3p^0)^6 p_{3/2}$ ($0\sim 17341\text{ cm}^{-1}$), 第二台染料激光 L_2 在 $5600\text{ \AA}\sim 6900\text{ \AA}$ 波段扫描, 结果如图 3 (a)、(b)。图中标出了谱线的波长和相应的跃迁能级, 谱线尖峰处标有 A, A', D , 它们表示跃迁类型。 A 表示第二步共振跃迁的下能级就是第一步共振跃迁的上能级 b , 如图 4, D 表示第二步共振跃迁的下能级就是第一步共振跃迁的下能级 a , A, D 均表示此种 DROGS 与碰撞无关。 A' 表示第二步共振跃迁的下能级 b' 距第一步共振跃迁的上能级 b 很近, 因气压高碰撞频繁, 引起粒子聚集数再分布, 能级 b' 上也有受到 f_1 调制的粒子数。从而当 L_2 扫描时, 得到 b' 跃迁到 e 的和频讯号 A' 。比较图 3 的 (a) 和 (b), 当铕蒸汽压 P_{Eu} 由 50 m Torr 降低到 10 m Torr , 总气

压由 140 mTorr 降低到 30 mTorr 时, A' 类型的跃迁基本消失, 只剩下与碰撞无关的 A、D 类型的跃迁, 使光谱简化, 便于标识。

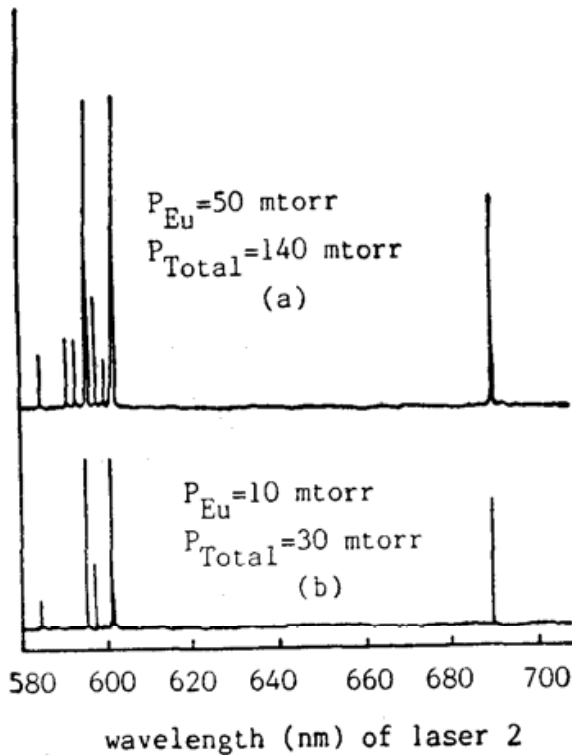


Fig. 3 DROGS in europium vapour
 $\lambda_1 = 5765 \text{ \AA} (0 \sim 17341 \text{ cm}^{-1})$

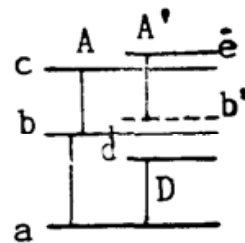


Fig. 4 Typical transition modes of DROGS

此外, 将图 3(b) 与铈的传统光谱学和近年激光光谱学^[2~5] 的结果加以比较, 本实验新观察到 4 条过去未曾报道过的谱线, 它们是 $5846.4 \text{ \AA} (4f^7 6s 6p^6 P_{7/2} - 4f^7 6s 6p^6 P_{7/2} - 4f^7 6s 6d^8 D_{5/2})$, $5955.8 \text{ \AA} (4f^7 6s 6p^6 P_{7/2} - 4f^7 6s 6d^8 D_{9/2})$, $5977.4 \text{ \AA} (4f^7 6s 6p^6 P_{7/2} - 4f^7 6s 6d^8 D_{5/2})$, $6890.8 \text{ \AA} (4f^7 6s 6p^6 P_{7/2} - 4f^7 5d^2 10 P_{7/2})$ 。

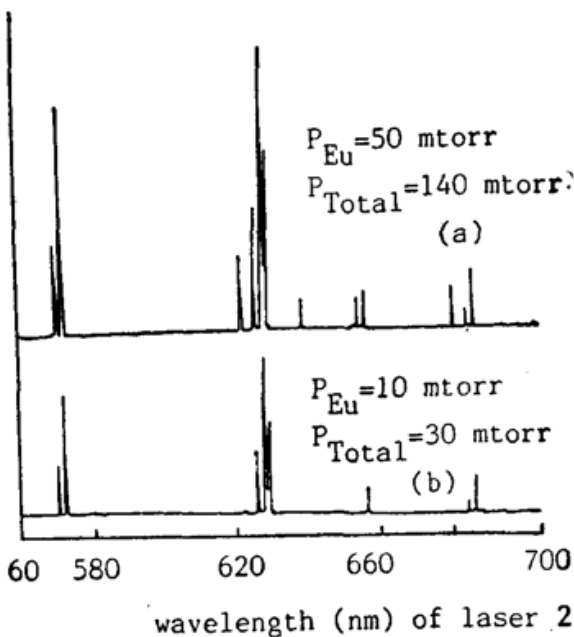


Fig. 5 DROGS in europium vapour
 $\lambda_1 = 6018 \text{ \AA} (0 \sim 16612 \text{ cm}^{-1})$

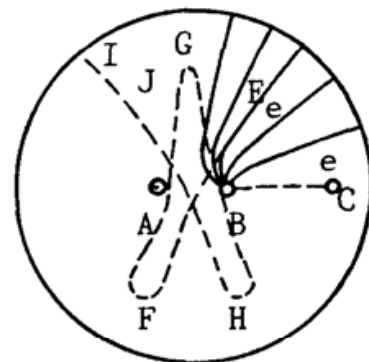


Fig. 6 Force field (solid lines) Possible paths (dashed lines) for a pair of poles A and B

将染料激光 L_1 调到 6018 \AA , 相应的跃迁能级为基态 $4f^7 6s^2 \ ^8S_{7/2}^0 \rightarrow 4f^7 ({}^8S^0) 6s 6p ({}^8P^0) \ ^8P_{9/2} (0 \sim 16612 \text{ cm}^{-1})$, L_2 在上述范围内扫描, 得到图 5(a)、(b)。除了再一次证实低气压可以简化光谱之外, 还新观察到 3 条未曾报道过的谱线, 他们是 $5707.9 \text{ \AA} (4f^7 6s 6p - {}^8P_{9/2} 4f^7 6s 6d \ ^8D_{9/2})$, $5728.2 \text{ \AA} (4f^7 6s 6p \ ^8P_{9/2} - 4f^7 6s 6d \ ^8D_{7/2})$, $6561.2 \text{ \AA} (4f^7 6s 6p \ ^8P_{9/2} - 4f^7 5d^2 \ ^{10}P_{7/2})$ 。

LPDP 除了上述简化光谱的优点之外, 还存在一些特点, 为说明这些特点, 我们先考查一下它的放电情况。图 6 是放电管横截面部分电力线(实线表示)分布, 为简单起见, 只考虑二根对称安装的钨丝 A 、 B 作为阳极, 和两种类型的电子运动轨道(虚线表示, 具体的运动轨道与电子的初始条件有关)。一种类型的轨道是电子由阴极 C 出发, 向阳极 B 运动, 在途中可能与其它粒子相碰撞, 也可能直接到达 B 而复合; 另一种类型的轨道是电子初始处于 E , 沿 E 、 F 、 G ……前进, 直到与其它粒子碰撞, 激发或电离原子。气体放电中自由电子的平均自由程

$$\lambda_e = \frac{1}{\pi \sigma^2 n} = \frac{KT}{\pi \sigma^2 P}$$

σ 为电子与原子的作用距离, 近似地等于原子半径, n 、 T 、 P 为原子密度, 温度和压强。在我们上述实验条件 $T = 900 \text{ K}$, $P_a = 30 \text{ mTorr}$ 下, σ 近似用 Ne 的半径 1.3 \AA , $\lambda_e \approx 6 \text{ cm}$, 因此由 C 出

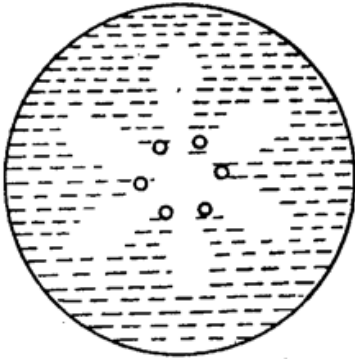


Fig. 7 Discharge pattern for six poles

发的电子经过 1.5 cm 之后, 基本上直接被 B 复合, 未与其它粒子相碰, 只有由 E 出发的电子在运动途中才可能与原子碰撞而使其激发或电离, 我们在实验中只看见辉光放电由中心向管壁呈梅花型, 花心在管轴, 花瓣在阳极钨棒之间, 如图 7, 阳极对中心的背荫区域暗淡无光。因此, 用这种对称阳极放电热管炉, 可以获得比 30 mTorr 低的气压的辉光放电, 而用线度相同的单根阳极放电管, 无论怎样增加电压, 也得不到辉光放电^[6]。因此 LPDP 使我们可能研究低气压放电光谱, 此其一。其二, 在梅花型辉光放电区域, 高速电子激发原子, 而原子之间又因气压低而碰撞少, 从而主稳态原子在激发态中

占有较高的比例, 我们在文章^[1]中证明了 Ne 放电是如此, 钨放电也应如此。其三, 当我们仅用一台激光 (6018 \AA) 将钨原子从基态泵到 $4f^7 6s 6p \ ^8P_{9/2}$ 态时, 只有放电才能收到 OGS 讯号, 如仅加 3 伏直流电压而不放电, 即因通常的热电二极管^[7]探测方法, 测不到讯号。说明梅花型辉光放电区域中高速电子还有使激发态原子电离的作用。仅仅靠热运动原子简单的碰撞, 还不足使激发态原子电离。其四, 由于管轴附近电场几乎为零, 大大减少了 stark 效应。最后, 由于样品气压很低, 所要求的热管炉温度也相应低, 从而对同一材料所制的热管, 可研究的金属也就多一些。当然, 使用 LPDP, 一方面为简化光谱希望减少碰撞, 另一方面为激发和电离又希望有一定的碰撞频率, 所以应根据具体实验, 寻找适合的气压, 一般总气压在几 mTorr 到几十 mTorr 范围为宜。

综合上述实验和分析, 说明 LPDP 是研究高 Z 元素高发态高分辨率光谱的有用工具。

参 考 文 献

- [1] C. L. Cromer, He Maoqi; «*Paper for the May '88 Meeting of the American Physical Society*», (Baltimore), to be published.
- [2] W. C. Martin, Romuald Zalubas *et al.*; «*Atomic Energy Levels: The Rare-Earth Elements*», (N. B. S., Washington D. C., USA, 1978).
- [3] F. Meggers, B. F. Scribner; «*Tables of Spectral-Line Intensities*», (N. B. S., Washington D. C., USA, 1975).
- [4] G. Smith, F. S. Tomkins; *Proc. Roy. Soc. Lond. (A)*, 1983, **387**, No. 1793, 389~406.
- [5] J. F. Wyart; *Physica Scripta*, 1985, **32**, No. 1 (Jan), 58~63.
- [6] A. H. McIlraith; *Nature*, 1966, **212**, No. 5153 (Dec), 1422~1426.
- [7] 何懋麒等; «*光学学报*», 1986, **6**, No. 11 (Nov), 997.

Low pressure symmetric discharge heat pipe and DROGS of Eu

HE MAOQI AND LUO RONGGEN

(Department of Physics, Fudan University, Shanghai)

C. L. CROMOR

(Division 531, National Bureau of Standards, U. S. A.)

(Received 31 July 1989; revised 4 October 1989)

Abstract

In this paper we describe a new low pressure symmetric discharge heat pipe (LPDP) which may be used to generate high Z low pressure metal vapour sample. We have studied the double resonance opto-galvanic spectroscopy (DROGS) of Eu atom in different pressure with the LPDP. Four new lines of Eu from 17341 cm^{-1} excited level and three from 16612 cm^{-1} are observed for the first time. It is verified that such a new LPDP is suitable for studying highly excited state spectroscopy of high Z metal elements.

Key words: LPDP; Eu; DROGS.