

用空心阴极放电管研究金属原子的光离化过程(I)——铀原子的共振三步光电离实验*

胡企铨 殷立峰** 张延平** 张桂燕**
景春阳** 崔俊文 舒海珍 林福成
(中国科学院上海光学精密机械研究所)

提 要

本文报道利用自制的 Kr-U 脉冲空心阴极放电管作为金属原子蒸气源,并用空心阴极放电管本身作为探测元件研究铀原子的共振双波长激发三步光电离过程的实验结果。

一、引 言

以往研究金属原子的光致电离过程,大多采用热管炉或原子束装置来获得原子蒸气;而用热电二极管、电子倍增管、通道电子倍增器或各种形式的放电计数管来探测原子的光致电离信号^[1,2]。热管炉只适用于产生低熔点金属原子蒸气;原子束装置虽然可以产生各种原子蒸气,但需要庞杂的加热设备、冷却系统和真空条件。

空心阴极放电(HCD)曾作为光谱光源而发展和利用,由于空心阴极放电具有很强的阴极溅射作用,可以得到相当高的原子蒸气密度($10^{11} \sim 10^{14}$ atom/cm³),而且空心阴极放电灯结构简单、工作条件要求不高,因此将它用作原子蒸气源可以进行很多激光光谱的研究^[5,6]。利用空心阴极放电管研究金属原子的光致电离过程,至今尚未有文献报道。本文报道利用自制的铀空心阴极放电管研究铀原子的三步共振光致电离过程和高激发态能级探测的实验结果。

二、实验装置与方法

基本的实验装置如图1所示。

铀空心阴极放电管长100 mm,挖有 3×7 mm²的矩形槽孔***,充有几 Torr 的氩作为放电缓冲气体。为了使放电不致干扰光致电离过程的探测,空心阴极放电采用脉冲方波供电。供电脉冲宽度为几百 ps,前沿上升时间及后沿下降时间小于 40 ns,峰值电流大于 600 mA。

收稿日期: 1985年10月10日; 收到修改稿日期: 1985年12月14日

* 本文曾在中国光学学会'85年会上宣讲。

** 在第四研究室工作,其余作者在第十三研究室工作。

*** 矩形槽型的铀空心阴极放电管加工容易,且通孔的阴极结构可以避免激发、电离的激光照射到阴极上产生光电效应。

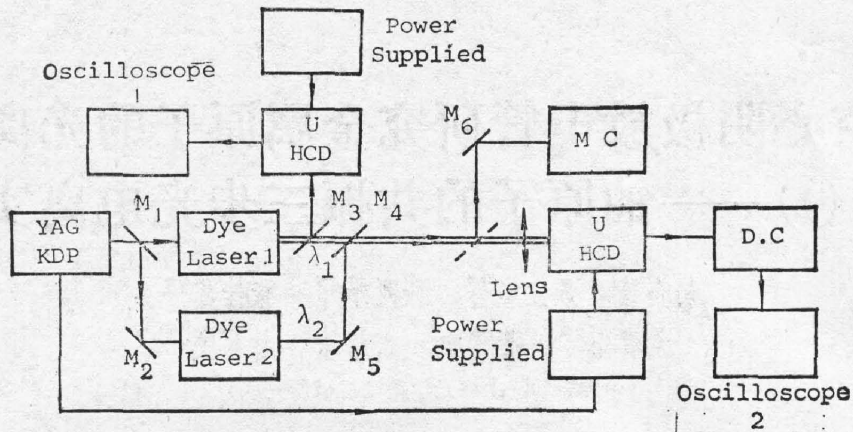


Fig. 1 Experimental setup using HCD for studying three-step photoionization of U atoms

大电流工作是为了保证空心阴极放电溅射产生足够高密度的原子蒸气。空心阴极放电管脉冲放电结束后延迟一段时间,再入射可调谐染料激光,以激发并离化铀原子。图 2 是空心阴极放电管供电脉冲与入射激光间的时间关系。

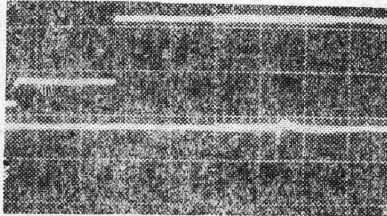


Fig. 2 Upper: HCD pulse; lower: laser signal (time scale: 200 μ s/div; vertical scale: 5 V/div)

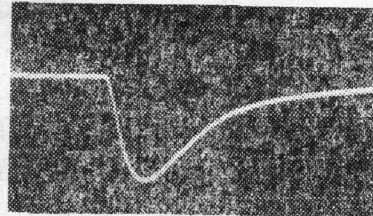


Fig. 3 Photo-ionization signal of U atoms (time scale: 10 μ s/div; vertical scale: 2 V/div)

在非放电条件下,我们用空心阴极放电本身来探测铀原子的光离化信号。探测部分选择合适的直流供电电压,既保证空心阴极放电管不致自持放电又有足够的探测光离化信号灵敏度。铀原子产生的光离化信号(如图 3 所示),用示波器直接观察并记录。图 4 给出

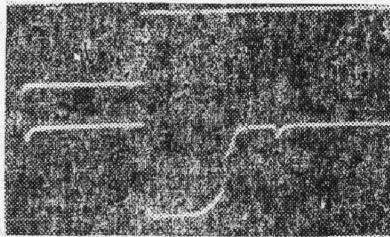


Fig. 4 Upper: HCD pulser, lower: photo-ionization signal of U atoms (time scale: 200 μ s/div; vertical scale: 5 V/div)

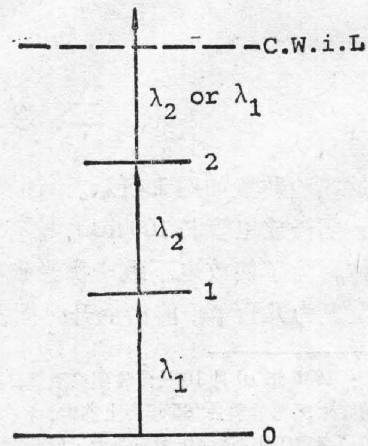


Fig. 5 A simplified diagram of the energy levels for photoionization

了空心阴极放电管供电脉冲与光致电离信号之间的时间关系, 图 4 中下轨迹所示的电离信号前面紧接着供电方波后沿的一个大信号是由于空心阴极放电余辉造成的。

采用一台调 Q 振荡——放大 YAG 激光器倍频后同时泵浦, 铀原子共振激发与光电离的两台可调谐脉冲染料激光器(两台之间可以用适当的延迟方法延时)。激光波长调谐范围 565~620 nm, 线宽 <0.02 nm, 脉宽 10 ns, 峰值功率为几百 kW, 发散角 10^{-3} rad。以光栅单色仪粗略标定激光波长, 进一步细调可以用铀空心阴极放电管的光电流光谱信号来保证激光波长与原子跃迁严格共振, 并以此作为监视。

用可变光学衰减适当控制波长为 λ_1 的第一级激发激光的强度, 避免铀原子在该波长激光作用下产生多光子光致电离。

第二级激发激光经一有孔反射镜反射后和第一级激发激光同向射入铀空心阴极放电管。焦距 10 cm 的透镜使两束激光在焦点附近的作用区重合。改变第二级激发激光波长 λ_2 , 合适的 λ_1 和 λ_2 组合可以使铀原子产生共振激发三步光电离过程。图 5 是这类光致电离过程简化的相应能级跃迁方案。

三、实验结果和讨论

1. 铀原子的共振激发三步光电离

用图 5 所示的共振双波长激发三光子光致电离原子的方案, 实验通过探测电离信号, 实现了铀原子的共振激发三步光电离。

用一台脉冲染料激光器激发, 在波长 591.5 nm 时, 实现了铀原子: 基态 $0-16900$ cm^{-1} — 33801 cm^{-1} — 50701 cm^{-1} (自电离态)的共振激发三步光电离。作为比较, 用 532 nm YAG 倍频强脉冲激光(脉冲峰功率达 MW 量级)作激发光也观察到了铀原子的三光子直接离化的信号, 但这信号比共振激发的三步光电离信号要小很多。

当我们把 λ_1 固定为 578.8 nm, λ_2 扫描, 也获得了铀原子: 基态 $0-17362$ cm^{-1} —高激发态—电离的共振激发三步光电离。

在我们共振激发三步光电离的实验条件下, 可以做到饱和电离所需的染料激光能量约 0.1 mJ 左右。光电离信号的幅度可达 10 V 左右, 信噪比相当好。

2. 高激发态能级探测

通过测量电离信号, 我们获得了铀原子的 f^3dsp 电子组态 7L_6 17362 cm^{-1} 能级共振激发的光致电离化谱。离化谱的分辨率为 0.5 \AA 。表 1 给出了一部分从所获得的离化谱探测到的铀原子 34000 cm^{-1} 附近的能级的波数值。表 1 中同时给出了文献[7]报道的用分步激发荧光探测到的相应能级波数值, 数据表明两者相当一致。

实验中, 7L_6 能级的铀原子是用波长 575.8 nm 的激光从奇宇称 ${}^5L_6^o$ 基态原子激发获得的, 表 1 所列的各个能级宇称也相应于奇宇称。但是实验测得的能级中有相当数量的能级, 在已发表的有关奇宇称铀原子能级文献数据中找不到相应数据。而且测量表明, 离化谱谱线的宽度差别也较大, 从狭的离化谱谱宽(与激光线宽相当)到谱宽达几 \AA 的量级不等。这表明实验中存在通过双光子共振激发把铀原子从 f^3dsp 组态直接激发到 $f^3d^2p^2$ 自电离态的可能, 根据文献[8]报道, 自电离态的离化截面比一般激发态离化截面至少要高一个数量级。

Table 1 Some of the highly excited odd-parity states of U atoms

scale	wave number(cm ⁻¹)		J
	Exp. Value	ref [7]	
25.078	34762.3	34765	5
25.18	34745.3	34746	5, 6
25.21	34740.4	34739	
25.32	34722.2	34725	5
25.365	34714.7	34717	5, 6
25.49	34694.0	34705	5, 6
25.68	34662.7	34664	5
25.80	34643.0	34640	5, 6
25.945	34618.7	34622	5, 6
26.08	34597.2	34600	6, 7
26.16	34584.1	34585	5
26.21	34575.9	34578	5, 6
26.31	34559.7	34555	5, 6, 7
26.72	34493.3	34486	6, 7
26.82	34477.2	34482	5
26.92	34461.1	34461	5
28.51	34209.4	34209	6
28.60	34195.3	34194	6
28.70	34179.7	34177	6, 7
28.81	34162.6	34165	5
28.87	34153.3	34155	6, 7
29.02	34130.1	34128	6
29.135	34112.4	34117	6
29.30	34086.9	34086	5
29.33	34082.4	34082	6, 7
29.41	34070.1	34070	5
29.47	34060.4	34055	6
29.57	34046.0	34048	6, 7
29.73	34021.1	34027	6
29.74	34019.6	34025	5
29.90	33995.2	34003	5
29.94	33989.1	33985	5, 6
29.95	33987.61	33984	6, 7
30.15	33957.3	33962	6, 7
30.20	33949.7	33952	6, 7
30.32	33931.6	33939	6

因而,适当安排实验布置,通过测量光离化信号和对离化谱能级的辨认,可以进一步用来研究原子的自电离态。

3. 能级电离截面的测量

用空心阴极放电管研究原子共振激发多步光电离过程的实验,当弄清金属原子的光离化离子数密度和光子通量、被测的电离信号参数之间关系后,原则上可以用来测量有关激发态的电离截面参数,这将另文讨论。我们曾尝试用这一实验技术测量铀原子非共振的三光

子电离时, 5L_6 基态的电离截面和共振激光三步光电离时, 7L_6 态的上一激发态的电离截面。根据文献[1]和我们所作的理论分析, 实验采用取交点方法求得的电离截面, 与文献[8]所报道的结果有相同的数量级。因我们的实验方案按图 5 所示进行, 光离化过程中激光束 λ_1 和 λ_2 都起作用, 所以用两台可调谐激光器来测电离截面存在一定问题, 即 λ_2 激光光强的变化也改变了能级 2 的激发速率。加上探测电路中外加直流电场对光离化过程的影响, 我们的实验所得的数据并不代表真正的电离截面值, 精确地测量截面值, 应该使用三台独立调谐的可分别控制光强的染料激光器。但是我们这种实验技术提供了一种简便的相对比较有关能级光电离截面大小的方法, 为选择优化的钠原子三步共振电离激光波长提供了方便, 因而非常有用。

四、结 论

我们利用自制的 Kr-U 脉冲空心阴极放电管作为金属铀原子蒸气源, 并用空心阴极放电管本身作为探测电离信号的元件, 研究了铀原子的共振激发三步光电离过程, 实现了铀原子基态— 16900 cm^{-1} — 33801 cm^{-1} — 50701 cm^{-1} 共振三步光电离; 铀原子基态— 17362 cm^{-1} — 34000 cm^{-1} 附近—电离的六十多组波长组合的光离化实验。探测到铀原子 34000 cm^{-1} 附近的几十条高激发态能级, 同已经发表的文献数据作了比较和确认。实验表明, 这一方法可以用来探测原子的高激发态和自电离能级, 可用作相对比较或测量高激发态的光离化截面参数。

由于空心阴极放电管可以产生几乎任何种类元素, 包括难熔金属原子的蒸气, 并能有效地进行放射性防护, 因此我们发展的用脉冲空心阴极放电管来研究原子的多步光电离过程的实验技术不仅对激光分离铀同位素的研究具有重要意义, 而且具有很大的应用价值和发展潜力。

参 考 文 献

- [1] V. S. Letokhov, V. I. Mishin *et al.*; *Quantum Electronics*, Vol. 5 (Pergamon Press, 1977), 139~203.
- [2] G. S. Hurst *et al.*; *Rev. Mod. Phys.*, 1979, **51**, No. 4 (Apr), 769.
- [3] F. J. DeHoog, G. J. Collins; *Phenomena in Ionized Gases*, (Berlin, Contributed Papers Part I, 1977), 307.
- [4] "Laser Program Annual Report-1979, Lawrence Livermore National Laboratory", UCRL-50021-79, 9~15.
- [5] 殷立峰, 胡企铨等; *光学学报*, 1984, **4**, No. 2 (Feb), 96.
- [6] 殷立峰, 胡企铨等; *光学学报*, 1985, **5**, No. 8 (Aug), 673.
- [7] E. Miron, R. David *et al.*; *J. O. S. A.*, 1979, **69**, No. 2 (Feb), 256.
- [8] G. S. James, I. Itzkan *et al.*; *IEEE J. Quant. Electron.*, 1975, **QE-11**, No. 9 (Sep), 101D.

**Study on three-step photoionization of U atoms
using a hollow cathode discharge tube**

HU QIQUAN, YIN LIFENG, ZHANG YANPING, ZHANG GUIYAN,
JING CHUNYANG, CUI JUNWEN, SU HAIZHENG AND LIN FUCHENG

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

(Received 10 October 1985; revised 14 December 1985)

Abstract

Reported here is an experimental investigation of the three-step photoionization of U atoms using a hollow cathode discharge (HCD) tube as both the atom source and photoionization signal detector.

接通知, 本刊 Vol. 6, No. 2, p. 109 的会议报道更正如下:

第 7 行中, 应为: 王之江副理事长为中国方面的节目委员会主席; 聂宝成理事任组织委员会主席;

第 12 行中, “信息”应为“光信息处理”

第 13 行中, 应为: 该专业委员会由副理事长金国藩任主任,
特向有关方面致歉!

编辑部