

利用HCD灯进行U激光敏化荧光光谱测量

殷立峰 胡企铨 李世芳 林福成

(中国科学院上海光机所, 201800)

摘要: 利用直流稳定放电的 Kr-U HCD 灯作为放电等离子体源, 在 591.54 nm 波长对 U 原子进行共振激发, 在 400~800 nm 波长范围内观察到了几百条激光敏化荧光光谱线, 并由此测定了 UHCD 灯中相应能级集居数增量的分布。

关键词: Kr-U 空心阴极灯, 激光敏化荧光

Measurement of fluorescence spectra sensitized by laser excited U-atoms with HCD lamp

Yin Lifeng, Hu Qiquan, Li Shifang, Lin Fucheng

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

Abstract: With a CW stably discharged Kr-U HCD lamp as discharge plasma source, the U-atom was resonantly excited at the laser wavelength 591.54 nm. In the wavelength range between 400 nm and 800 nm, several hundreds of laser sensitive fluorescence lines were observed. The distribution of related level population increasement was measured by this method.

Key words: Kr-U HCD lamp, laser sensitive fluorescence

利用共振激光激发放电等离子体, 不仅可以产生激光感生荧光光谱, 还可以产生激光敏化荧光光谱。用足够强的激光共振激发原子的某一跃迁, 可使相应上能级获得集居数的增加。通过测量相应的共振感生荧光可以研究这一能级集居数的增量。此外, 在放电等离子体中, 由于碰撞转移过程的存在, 如部分离化等离子体中电子与原子、离子与原子、激发原子与基态原子之间的碰撞转移, 激光共振激发形成的某一能级增加的集居粒子会向邻近相关的能级转移并在这些能级上形成集居数的增量。这些集居数增量所产生的发射光谱称为激光敏化荧光。

Hess 和 Burrell^[1] 及黄元网^[2,3] 等利用激光敏化荧光测量研究了 He 放电等离子体中原子能级碰撞转移速率获得了很好的结果。我们过去利用激光敏化荧光法, 测量了 Ne-Zr HCD 灯在激光共振激发时, Ne 和 Zr 中所有产生变化的能级集居数增量。通过所得到的定量信息研究了 Ne 连续光电流光谱中反常信号存在的机理^[4], 并在此基础上提出了完整的光电流效应的理论模型。

铀原子具有非常复杂和密集的能级结构, 很容易获得激光敏化荧光光谱。U 空心阴极放电(HCD)灯是简便易得的 U 放电等离子体, 可以利用来进行 U 激光敏化荧光光谱的测量研

究。我们利用直流稳定放电的 Kr-U HCD 灯作为放电等离子体源, 采用连续染料激光器进行共振激发, 观察研究了 U 原子的激光敏化荧光光谱, 并由此测定了激光共振激发时, U HCD 灯中相应能级集居数增量的分布。

整个实验装置与过去所用的相同。采用 Ar^+ 激光器泵浦的连续染料激光器作为激发光源。染料激光器波长调谐范围为 570~620 nm, 激光线宽约 20 MHz。采用普通的 0.6 m 光栅单色仪扫描测量。整个测量系统用标准钨带灯进行了定标。测量中利用铀原子的光电流光谱作为激光波长和功率稳定监测。

利用 591.54 nm 激光共振激发 ($0 \sim 16900 \text{ cm}^{-1}$), 测量了 Kr-U HCD 灯的激光敏化荧光光谱。591.54 nm 激光的单模输出功率约 40 mW, 已经达到饱和吸收。在 400~800 nm 波长范围内, 测量到了 400 条以上的敏化荧光谱。图 1 给出了部分实测谱图。采用某些已知谱线的相对 gf 数^[5] 和所测定的敏化荧光谱对共振激光作用下 HCD 灯中 U 原子能级集居数的增量进行了分析。这是利用了能级集居数 N 与自发辐射强度 I 之间的下列关系式:

$$N \propto I\lambda^2/gf$$

式中的 λ 是自发发射的波长。表 1 中给了 $I\lambda^2/gf$ 的值。利用所测得的 400 多条敏化荧光谱校正后的强度及 Corliss 给出的 gf 值, 计算并给出了各能级上粒子集居数增量的分布。在 591.54 nm 激光激发的情况下, 集居数增加的能级范围为 $13000 \sim 28000 \text{ cm}^{-1}$, 由于单色仪的测量范围限制, 没有给出 13000 cm^{-1} 以下能级的分布。这一分布是以 16900 cm^{-1} 能级为极大值点, 随着能量的增大(或减小), 能级粒子集居数增量也逐渐减小。图 2 给出了这一分布曲线。在获得了能级粒子集居数增量的分布关系后, 利用上述关系式, 可以测量得到其它未知谱线的 gf 数。表 1 中列出了部分测量结果。其中除九个标有 [5] 的数据来源于 C. H. Corliss 并作为计算根据外, 其余是我们的测量结果。也测量了敏化荧光强度随 HCD 灯工作电流的变化关系, 结果见图 3。随着灯电流的增大敏化荧光强度也增大并逐渐趋向饱和。这一变化规

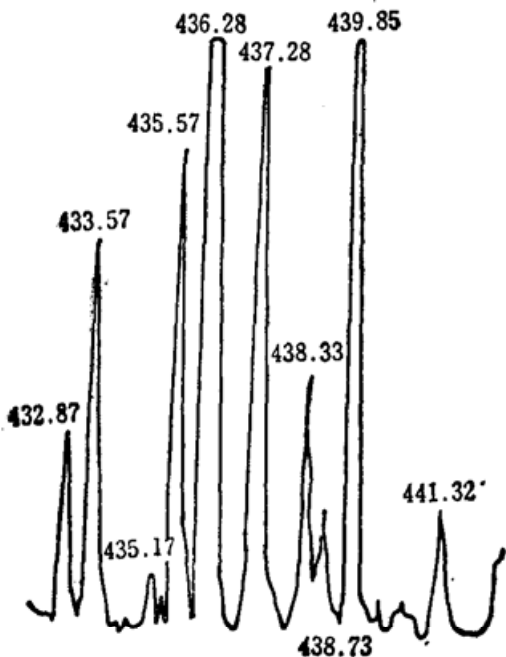


Fig. 1 Laser sensitized fluorescence spectrum of U HCD lamp. The exciting laser wavelength is 591.54 nm

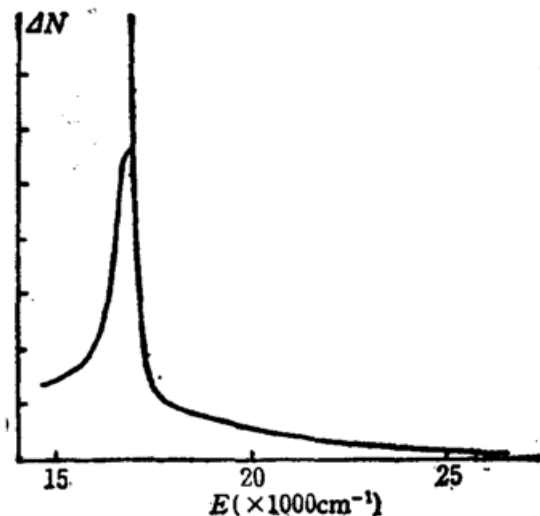


Fig. 2 Variation of energy level population increase ΔN as a function of the energy level. The exciting laser wavelength is 591.54 nm

律是与激光感生荧光强度的变化规律相同的。

实验结果表明,除了来源于作为计算基础的数据的误差外(Corliss 数据的误差为 $\pm 20\%$),主要误差来源于染料激光器的频率和功率稳定性。进一步采用高稳定性的激光器可以使实测数据的精度大大提高。

也利用 597.15 nm 激光共振激发 ($620 \sim 17361 \text{ cm}^{-1}$) 测量了相应的敏化荧光光谱。在 400~800 nm 波长范围内测量到了近百条敏化荧光光谱。

在 HCD 放电等离子体中,敏化荧光光谱主要是由电子-原子和原子-原子碰撞转移过程产生的。通过对 U 原子敏化荧光光谱的定量测量,还可以获得有关 U 原子能级碰撞转移速率的信息。有关的方法在文献[1~3]中已有详细论述,本文不再重复介绍。此外,由于共振激光的激发和碰撞转移的作用,HCD 灯中某一铀原子能级群将大大增加粒子集居度。通过测量相应的敏化荧光光谱强度分布,可以利用已知的 gf 数导出相应的粒子集居数增量的分布。因而利用这一方法可以测量某些跃迁的未知 gf 数。由于某些敏化荧光谱线具有比常规发射谱高的信噪比,因而可以获得更高的测量精度。同时利用二束激光级联共振激发,再用相应的方法可以测出高能级跃迁的相对跃迁 gf 数。由于

放电激发温度的限制,这是常规发射光谱所无法测量的。因而它能补充常规方法的不足之处。

Table 1 A portion of laser sensitized fluorescence lines of U HCD lamp
(exciting laser wavelength is 591.54 nm)

Wavelength (nm)	Intensity	Upper level	Lower level	gf	$\lambda^2 I / gf (10^6)$
752.45	29.6	17154	3868	0.019	865
753.16	37.0	24906	11633	0.080	264
753.39	318.5	17070	3800	0.20	904
759.05	36	18932	5762	0.031	669
761.94	40	20766	7645	0.048	435
762.64	52	20114	7005		
763.17	691.7	16900	3800	0.049	8220
763.95	87.0	17361	4275	0.066	769
764.36	34.8	20943	7804	0.043	476
764.89	52.2	23325	10254	0.088	348
765.87	36.4				
766.40	18.2	26391	13346	0.058	184
767.09	40.9	18794	5762	0.041	591
768.15	59.1	17468	4453	0.049	719
774.82	40	28943	16040	0.51	47.1
775.42	60	20218	7326	0.070	515
776.52	30				
778.42	168.4	13463	620	0.028	3644
785.30	111				
785.67	44.4	19828	7103	0.051	536
788.19	76.5	18932	6249	0.081	584
788.85	176.5				
790.04	87.5	16929	4275	0.044	1241
790.29	131.3				
791.88	800	16900	4275	0.044	11400
792.21	106.7	22700	10081	0.18	382
793.44	53.3	22854	10254	0.090	373

(下转第 194 页)

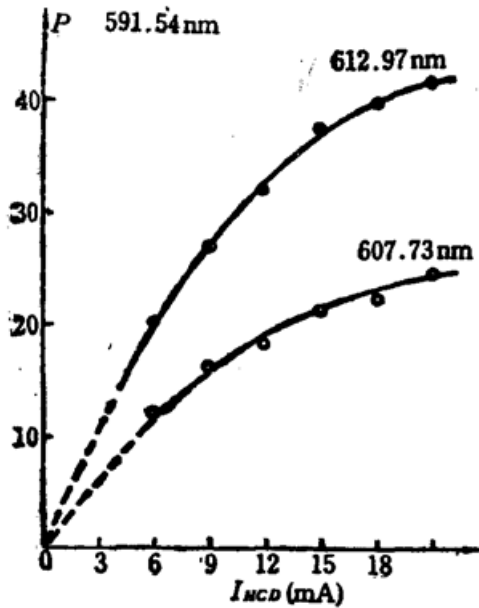


Fig. 3 Variation of the intensity P of laser sensitized fluorescence as a function of the current I of HCD lamp. The exciting laser wavelength is 591.54 nm

线相对激光垂直辐照时变宽,使谱的分辨降低,如图 2 所示。

综上所述,不同角度激光打靶条件下,由于激光与等离子体相互作用的能量耦合效率不同,影响 LPX 转换效率,使得等离子体 LPX 发射光谱结构相差很大,另外不同的有质动力作用,使等离子体喷射特性和 LPX 光源的几何形状也有明显差异。

最后须指出,上述实验结果中,由于透镜调焦误差为 1%,能量测量误差 2% 及激光脉宽抖动等导致激光辐照在靶面的功率密度的误差约为 5% 左右。考虑晶体均匀性,暗盒窗口薄膜均匀性及底片显、定影中的误差,导致各底片 LPX 相对强度的实验误差为 10% 左右。另外还考虑实验中的数据处理及原底片标定的误差,本文所得的定量结果总误差在 30% 左右。

参 考 文 献

- 1 Zhi-zhan Xu *et al.*, *Phys. Rev. A*, **39**, 808(1989)
- 2 G. Kuhnle *et al.*, *Appl. Phys.*, **B47**, 361(1983)
- 3 J. A. Cobble *et al.*, *Phys. Rev. A*, **39**, 454(1989)
- 4 徐至展 *et al.*, 物理学报, **29**, 439(1980); *Chinese Phys.*, **1**, 548(1981)
- 5 J. W. Shearer, *Phys. Fluids*, **14**, 183(1971)
- 6 R. Balian, J. C. Adam, Session XXXIV, 1980-Interaction Laser-plasmas (Eds Les Houchs), North-Holland Publishing Company, 307(1982)
- 7 A. H. Gabriel, *M. H. B. A. S.*, **169**, 99(1972)
- 8 项志遵,俞昌旋,高温等离子体诊断,上海科学技术出版社,61(1982)

(上接第 204 页)

在 591.54 nm 激光共振激发的实验中,我们还观察到 U 原子 16900 cm^{-1} 能级在光抽运作用下,与某些下能级($16900\sim 4275\text{ cm}^{-1}$)间形成了粒子数反转,因而产生了放大的自发辐射(ASE)现象。由表 1 中可看出,791.88 nm 波长的 $\lambda^2 I/gf$ 值为 11400,远大于 763.17 nm 的 $\lambda^2 I/gf$ 值的 8220。而这二个跃迁的上能级均为 16900 cm^{-1} 。我们认为这一现象来源于前者的 ASE 作用。这一结果也表明,有可能用 HOD 灯对 U 原子的 ASE 现象进行进一步的深入研究。

利用 HOD 灯进行 U 原子敏化荧光光谱测量研究的实验装置简单。而 U 原子的能级密集,在激光共振激发时,易于观察到敏化荧光光谱。U 敏化荧光光谱中包含大量有用的信息,利用这一方法可以对 U 原子能级及其相互作用中的许多参数进行测量研究,因而具有很大的实用价值。

参 考 文 献

- 1 R. Hess, F. Burrell, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.*, **21**(1), 23 (1979)
- 2 黄元网,光学学报, **4**(3), 223(1984)
- 3 黄元网,考尔贝,伯吉斯,光学学报, **4**(8), 680(1984)
- 4 殷立峰,胡企铨 *et al.*, 光学学报, **7**(2), 126(1987)
- 5 O. H. Corliss, *J. Res. Natl. Bur. Stand.*, **80A**(1), 1(1976)