

铀空心阴极放电灯的光谱特性研究

殷立峰 林福成 张桂燕 景春阳 姜世杰* 王之江**

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

提 要

本文报道了利用自制铀空心阴极放电灯进行U发射光谱的测量研究。通过一系列铀空心阴极放电灯光谱特性参数的测量,分析了作为光谱测量用的铀空心阴极放电灯的最佳工作参数。并且报道了我们测量的部分U原子发射光谱的发射强度和 gf 数。

关键词: 铀; 空心阴极放电; 发射谱。

U是天然存在的最重元素,原子序数为92,是一种放射性元素。U原子具有复杂的能级结构和密集的原子光谱线。早在1946年, Kiess的研究工作就给出了一部分U原子光谱和能级的数据。此后,近40年时间内,国外对U光谱进行了大量研究,陆续有一些研究结果发表,但重要成果仍然是保密的。近十几年来,有一部分有关U光谱数据的资料发表在美国的 Los Alamos Scientific Laboratory (LASL)的几份报告中^[1~4]。

参考文献[2~5]主要报道了实验测定的U原子光谱数据和能级参数。这些数据都是利用高精度的大型设备如9.15 m的Paschen-Range摄谱仪、大型Fabry-Perot干涉仪、Fourier变换光谱仪等进行测量并由计算机处理得到的。

为了测定U原子光谱数据,必须获得U原子蒸汽。由于U金属具有高达2500 K的蒸发温度,因而如何获得U原子蒸汽在技术上就具有一定的难度。在已经知道的产生高密度难熔材料原子蒸汽的方法中,阴极溅射是最简单的方法之一。铀空心阴极放电提供了一种可用于各种物理现象包括光谱研究的U蒸汽源。铀空心阴极放电灯加工简单、工作可靠、容易维护、易于进行放射性防护,具有很多优点。

我们利用自制的UHCD灯和常规光谱仪器进行了U发射光谱的测量研究,获得了一系列UHCD灯的光谱特性参数。实验表明,在我们的条件下获得的结果与美国LASL利用高精度设备所得到的结果是一致的。

自制的铀空心阴极放电灯采用了矩形槽空阴极结构,阴极剖面见图1所示。贫铀纯金属制成的阴极棒上阴极槽的截面是3 mm×7 mm的矩形,阴极的有效长度是100 mm。灯内所充的缓冲气体是Kr。用直流稳压电源供电以保持放电稳定。用普通的0.6 m光栅单色仪测量光谱,对讯号进行调制并利用锁相放大器以提高探测灵敏度和信噪比,图2为实验装置示意图。实际测量前,利用已定标的标准钨带灯,对单色仪(包括光电倍增管)的频率响应曲线进行了测定。在实测中,利用这一曲线对实验数据进行修正。

收稿日期: 1989年4月19日; 收到修改稿日期: 1989年7月6日

* 上海光机所九室。

** 上海光机所十一室。

在不同的放电电流及 Kr 气压下测量了 U 和 Kr 的发射光谱强度。图 3 显示了四个 U 跃迁和两个 Kr 跃迁(U: 5780.6 Å、5836.0 Å、5915.4 Å、5948.6 Å、Kr: 5866.8 Å、

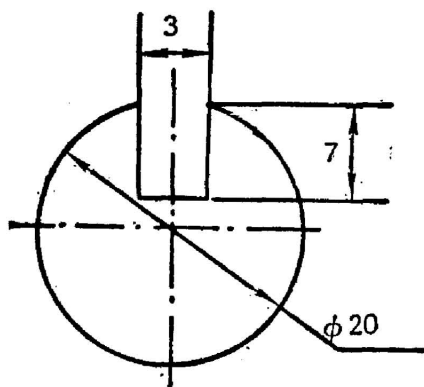


Fig. 1 Cross section of U hollow cathode

5870.9 Å)在不同放电电流下的发射谱强度。结果表明,在大电流工作时,随着电流的增加,U 和 Kr 的发射谱强度都出现了明显的饱和甚至向下弯曲的现象。特别是对于下能级具有较大密度粒子集居数的跃迁(U 5915.4 Å; 下能级为基态,Kr 5870.9 Å; 下能级为亚稳态)这一现象更为明显,因而说明该现象主要起因于自吸收效应。由图 3 可以看出,在放电电流小于 40~50 mA 时,自吸收效应的影响就很小甚至可以忽略。随着放电电流的减小,与 Kr 发射谱的变化不同,U 发射谱强度明显减小,并且在约 15 mA 附近基本减小到零。这是由于空阴极放电

中阴极原子蒸汽的溅射密度与放电电流的 n 次方成正比(n 与阴极材料,缓冲气体及阴极温度有关,大约为 2~5),因而在小放电电流时,U 原子蒸汽密度急剧减小所致。根据 U 发射强度与放电电流的关系曲线,在利用自制铀空心阴极放电灯进行发射谱研究时,可以选择一个合适的放电电流。

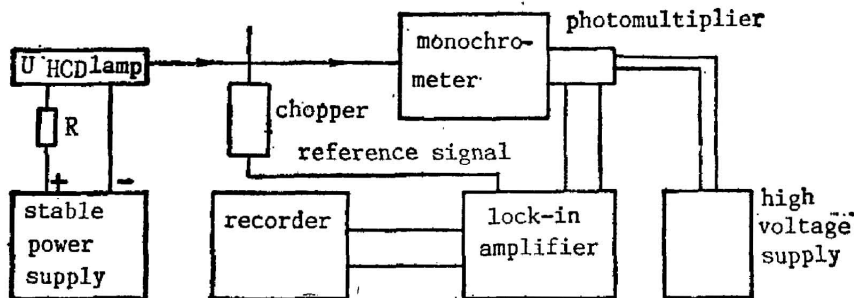


Fig. 2 Schematic drawing of the experimental arrangement

对于处于局部热力学平衡(LTE)的原子跃迁自发辐射强度,有下列公式:

$$I\lambda^3/gf \propto \exp(-E_u/kT), \quad (1)$$

其中 I 为跃迁的自发辐射强度, λ 为跃迁波长, gf 为跃迁的相对振子强度, E_u 为跃迁上能级能量, k 为 Boltzmann 常数, T 为原子激发温度。利用(1)式由测量的发射谱强度和已知的 gf 数,可以计算空心阴极放电灯中的原子激发温度。采用 Corliss 给出的 U 原子跃迁的 gf 数^[5],通过测量 U 原子发射谱强度,给出 U 原子激发温度 T 随放电电流的变化关系(图 4),和不同 Kr 气压下的 T (图 5)。结果表明,随着放电电流的增加, T 的基本趋势是减小,但在 20~80 mA 的电流范围内,这一变化不是很大。Kr 气压的变化对 T 的影响要大一些,这一点表明 U 原子的激励过程与缓冲气体 Kr 有很大关系。

图 6 给出了不同 Kr 气压下 U 发射谱强度的变化。显然,对于 U 原子的激励,存在着一个最佳的缓冲气体压强范围。在我们的实验条件下,这一最佳 Kr 气压的范围约为 1.0~1.5 Torr。

利用自制的铀空心阴极放电灯和常规的光谱仪,我们测定了 U 的原子发射光谱。通过

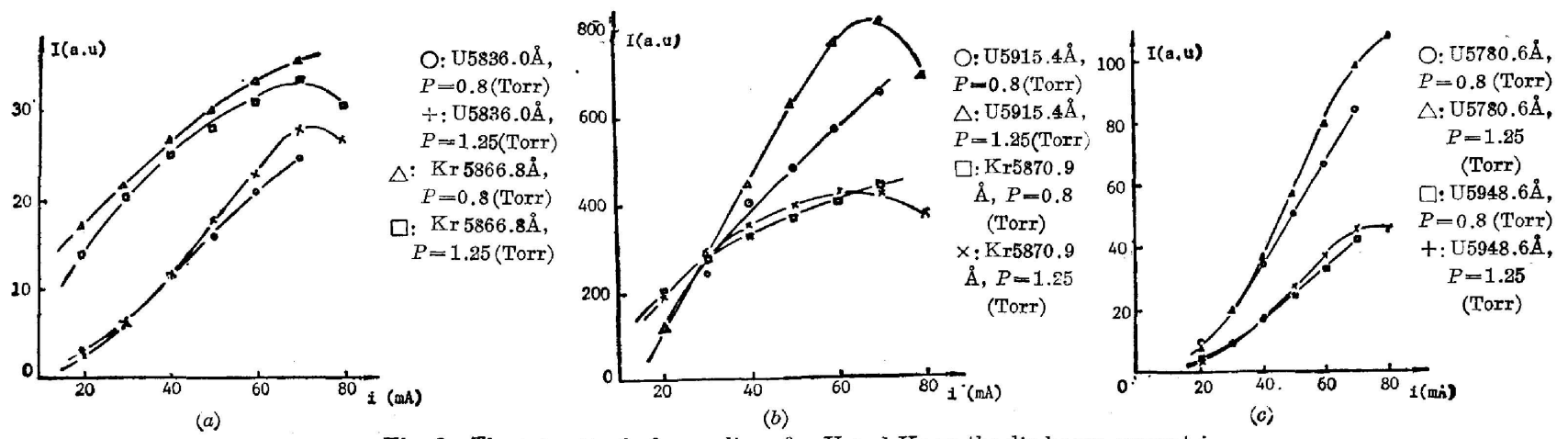


Fig. 3 The intensity I of some lines for U and Kr vs the discharge current i

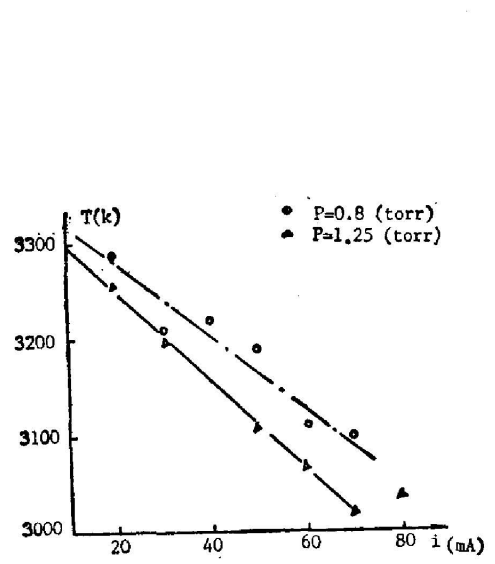


Fig. 4 The excited temperature T of U atom as a function of the discharge current i

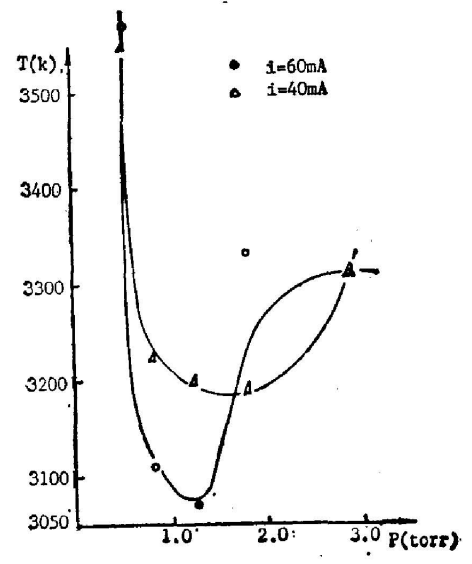


Fig. 5 T vs the Kr pressure P

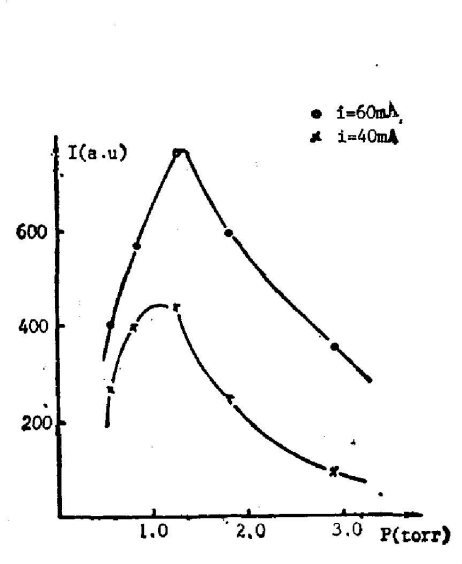


Fig. 6 The intensity I of the 5915.4 Å line for U vs the Kr pressure P

Table 1 Experiment data for some lines of U

Wavelength(\AA)	Upper level(cm^{-1})	J	Lower level(cm^{-1})	J	Intensity	gf
5852.0	21536 ^e	3	4453	4	13.8	0.046
5854.5	23325 ^e	5	6249	6	2.95	0.022
5856.4	17070 ^e	6	0	6	8.37	0.0036
5859.7	27349 ^e	5	10288	6	2.45	0.11
5862.0	21329 ^e	5	4275	6	5.43	0.016
5863.4	24070	5	7020 ^e	4	6.26	0.065
5868.8					1.78	
5874.8	27086 ^e	8	10069	7	1.33	
5878.1	24333 ^e	7	7326	7	1.32	
5883.5	22754 ^e	6	5762	5	1.12	
5884.4	21265 ^e	6	4275	6	1.58	0.0047
5887.6					2.00	
5891.4	27020	5	10051 ^e	5	1.47	
5892.6	20766 ^e	7	3800	7	12.8	0.030
5898.8	23197 ^e	7	6249	6	7.95	0.056
5902.5	20805 ^e	3	3868	3	18.7	0.045
5905.1	16929 ^e	5	0	6	3.11	0.0013
5906.1	23932 ^e	5	7005	6	1.69	
5906.1	24118 ^e	3	7191	2	1.69	
5907.8	30490 ^e	8	13567	7	0.70	
5910.4	24560 ^e	7	7645	8	1.78	0.023
5911.6	20712 ^e	8	3800	7	7.12	0.017
5915.4	16900 ^e	7	0	6	430	0.18
5919.7	23908	3	7020 ^e	4	2.38	0.035
5923.7	28184 ^e	9	11308	9	3.99	
5923.7	21329 ^e	5	4453	4	3.99	
5925.5	24517 ^e	9	7645	8	8.66	0.11
5927.9					0.72	
5929.3	20661 ^e	6	3800	7	6.25	0.014
5933.8	17468 ^e	4	620	5	38.3	0.021
5935.5	23848 ^e	7	7005	6	1.96	0.016
5937.3	27394 ^e	5	10557	4	0.87	
5940.0	24022 ^e	3	7191	2	2.12	0.022
5942.8	22584 ^e	4	5762	5	5.98	0.033
5948.6	24451 ^e	8	7645	8	7.42	0.094
5949.7	21078 ^e	5	4275	6	6.97	0.019

选择合适的铀空心阴极放电灯工作参数, 获得了满意的结果。表 1 列出了 5850 \AA ~ 5950 \AA 范围内的测量结果, 其中所列出的上、下能级和 J 量子数是引自参考文献 [3] 和 [5], 上标 e 表示偶宇称能级, 凡是未列出上下能级值的是暂时未确定能级归属的跃迁。利用这一实验装置也能测量到一些一价 U 离子的谱线。但在表 1 所列的波长范围内没有测量到。对实验中的各种误差来源进行了测定和分析, 估计相对误差 $< 20\%$, 绝对误差不大于 0.35 相对强度单位。这一测量用的铀空心阴极放电灯的工作参数为: Kr 气压 1.4 Torr; 放电电流

40 mA, 相应于这些工作参数的 U 原子激发温度 $T=3200 \pm 200$ K。根据测量结果计算的 gf 数也列在表 1 中, gf 数的相对误差大约为 40%。除了实验测量中的系统误差外, 主要影响 gf 数精确度的是原子激发温度计算的误差, 这是由于空心阴极放电对 Boltzmann 分布的偏离和 Corliss^[5]数据的误差所造成的。

利用铀空心阴极放电灯通过阴极溅射获得 U 蒸汽是一种简单易行的方法。我们利用自制的铀空心阴极放电灯和常规光谱仪器进行了 U 发射光谱的测量研究, 获得了很好的结果。所获得的 U 光谱数据为今后进一步的研究提供了良好的基础。

参 考 文 献

- [1] David W. Steinhaus; "Present Status of the Analyses of the Arc Spectrum of Uranium(U)", LA-3475, Los Alamos Scientific Laboratory of the University of California, Los Alamos, New Mexico 87544, 1966).
- [2] David W. Steinhaus; "Present Status of the Analyses of the First and Second Spectra of Uranium (U I and U II) as Derived from Measurement of Optical Spectra.", LA-4501, Los Alamos Scientific Laboratory of the University of California, Los Alamos, New Mexico 87544, 1971).
- [3] David W. Steinhaus. "The Emission Spectrum of Uranium between 19080 and 30261 cm^{-1} ." LA-4944 Los Alamos Scientific Laboratory of the University of California, Los Alamos, New Mexico 87544, 1972).
- [4] Byron A. Palmer et. al.; "An Atlas of Uranium Emission Intensities in a Hollow Cathode Discharge" (LA-8251-MS, Los Alamos, New Mexico 87544, 1980).
- [5] C. H. Corliss; *J. Res. Natl. Bur. Stand.* 1976, **80A**, No. 1, 1.

Investigation of the spectral characteristics of U HCD lamp

YIN LIFENG, LIN FUCHENG, ZHANG GUIYAN, JING CHUNYANG, JIANG SHIJE AND WANG ZHIJIANG
(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

(Received 19 April 1989; revised 6 July 1989)

Abstract

Investigation of the emission lines of U atom by using a homemade U hollow cathode discharge lamp is reported. From the measurements of spectral characteristic parameters of U HCD lamp the optimal working conditions for spectral measurements are obtained. The measured data of some emission lines and gf values of U atom are also given.

Key words: Uranium; hollow cathode discharge; emission spectrum.