

空心阴极灯中镧原子消多普勒光谱*

罗才雁** 瞿佳男 朱利洲 林福成 姜士杰
(中国科学院上海光学精密机械研究所)

提 要

我们在自制的 La-Kr 阴极灯中,用内调制、消多普勒荧光法研究了镧原子一些能级的超精细结构。据我们所知,其中 20197.34 cm^{-1} 、 21447.86 cm^{-1} 能级的超精细结构常数 A 、 B 尚无报道,这还是第一次。此外,还获得了线宽小于 40 MHz 的线型和来自公共低能级的所有交岔线(Cross-Over line)。对阴极灯中原子光谱特性进行了研究。

关键词: 镧阴极灯;超精细结构;交岔线。

一、引 言

由于稀土元素原子光谱结构的复杂性,人们对稀土元素超精细结构研究还很不完善。自1957年 Ting 用原子束磁共振方法研究了镧的基态能级超精细结构后^[1],人们在理论和实验上对镧进行了大量的研究^[2,3]。此后 Childs 等人用原子束装置研究了镧的一些能级的超精细结构^[4,5]。1983年 Beherens 等人则在镧阴极灯中用内调制方法,通过监测光电流光谱,研究了镧的一些能级超精细结构^[6]。1988年 Govindarajan 等人在镧阴极灯中,于未消多普勒效应情况下,也对镧的一些能级进行了研究^[7]。尽管人们对稀土元素镧已进行了一系列研究,但还很不完善。本文报道了自制 La-Kr 阴极灯中,用内调制无多普勒效应(Doppler free)的方法,通过监测荧光,所得实验结果,与前人的工作进行了比较;还分析了阴极灯中原子光谱的特性。

二、实验装置

实验装置如图1所示。它由 La-Kr 阴极灯,激光光源,激光频率监视及荧光信号检测系统所组成。

由 La-Kr 阴极灯通过溅射,形成镧的原子蒸气,其气压为 2 Torr ,为消除激光散射所引起的噪声,采用布氏角窗。

由 Ar^+ 激光器泵浦的 380D 环型染料激光器(美国 Spectra Physics 公司生产)作光源,染料为若丹明 6G,调谐范围为 $5700\sim 6200\text{ \AA}$,线宽为 10 MHz ,输出峰值功率为 170 mW ,激光稳频后,可在 30 GHz 内连续扫描。波长由 Burleigh 公司生产的六位波长计,及自由光谱区宽度为 2 GHz 的扫描干涉仪监视。

收稿日期: 1990年3月14日;收到修改稿日期: 1990年4月25日

* 本实验为国家自然科学基金资助。 ** 现在地址: 中国科学院武汉物理研究所。

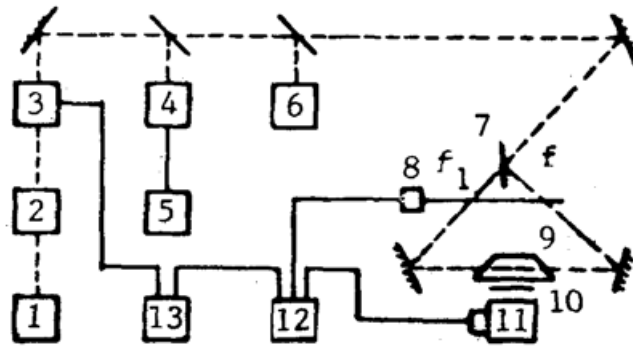


Fig. 1 Experimental setup for Doppler-free spectroscopy.

1. Argon-ion laser 2. 380D ring dye laser 3. Stabilized system 4. F-P interferometer
5. Oscilloscope 6. Wavelength meter 7. 50% reflect mirror 8. Chopper 9. La-Kr lamp
10. Focus lens 11. Monochromator 12. Lock-in amplifier 13. X-Y recorder

激光经聚焦后, 通过一块半透半反镜, 被分成光强大致相等的两束激光, 从两个布氏角窗反向射入 La-Kr 阴极灯, 调制频率分别为 f_1 和 f_2 , 其和频 $f_1 + f_2$ 信号, 及光电倍增管所探测的荧光信号, 均输入锁相放大器, 然后输入 X-Y 记录仪记录其谱线。

三、结果与分析

我们所得到的跃迁波长及其相应能级列于表 1。所有的跃迁都得到了较好的信噪比。利用 Casimirs 公式对光谱进行了分析, 可计算出相应能级的超精细结构常数 A 和 B 。超精细结构能量分量为: $W_F = \frac{1}{2} A(J) \cdot C(F) + B(J) \cdot D(F)$; $C(F) = F(F+1) - I(I+1) - J(J+1)$; $D(F) = \{3C(F)[C(F)+1] - 4I(I+1)J(J+1)\} / [8IJ(2I-1)(2J-1)]$ 。而超精细结构跃迁的相应强度为: $(2F+1)(2F'+1) \begin{bmatrix} J & I & F \\ F' & 1 & J' \end{bmatrix}^2$ [8]。根据以上公式, 可大致确定上、下能级的 F 值, 并用最小二乘法进行拟合计算, 可计算出各能级的超精细结构常数 A 和 B 。其中 A 代表原子核的磁偶极矩与核外电子所产生的场间相互作用, 即磁超精细相互作用常数; B 为原子核的电四极矩与核外电子云电场梯度间的相互作用, 即电四极超精

Table 1 Transition wavelengths under study

series	transition	lower energy(cm^{-1})	higher energy(cm^{-1})	wavelength(\AA)	fluorescence monitored(\AA)
1	$4F_{3/2} - 4F_{3/2}^{\circ}$	2668.188	20082.98	5742.24	5272
2	$4F_{3/2} - 2F_{3/2}^{\circ}$	2668.188	20018.99	5763.42	5272
3	$4F_{5/2} - 4F_{3/2}^{\circ}$	3010.002	20082.98	5857.21	5254
4	$4F_{3/2} - 2F_{1/2}^{\circ}$	2668.188	20197.34	5704.78	4951
5	$4F_{7/2} - 2F_{7/2}^{\circ}$	3494.526	20763.21	5790.86	5632
6	$4F_{7/2} - 2F_{5/2}^{\circ}$	3494.526	20972.17	5721.59	4768
7	$4F_{9/2} - 2F_{7/2}^{\circ}$	4121.572	21447.86	5771.57	4903

Table 2 A and B constants (observed)

series	configuration	SLJ	energy (cm ⁻¹)	the present		the other work		reference
				A (MHz)	B (MHz)	A (MHz)	B (MHz)	
1	5d ³ 6s	⁴ F _{3/2}	2668.188	480	15	-480.6	14.1	9
2	5d ³ 6s	⁴ F _{5/2}	3010.002	300	8.2	300.5	10.8	10
3	5d ³ 6s	⁴ F _{7/2}	3494.526	471.8	21.5	462.8	17.9	10
4	5d ³ 6s	⁴ F _{9/2}	4121.572	473.4	25.7	489.5	31.5	10
5	5d6s6p	² F _{3/2} ^o	20018.99	-40.7	-2.4	-41.1	1.8	9
6	5d ³ 6p	⁴ F _{3/2} ^o	20082.98	90.2	-3.4	87	-2	5
7	5d6s6p	² F _{1/2} ^o	20197.34	131.5	0	-	-	
8	5d ³ 6p	² F _{5/2} ^o	20972.21	-65.2	31.5	-66.4	35	5
9	5d ³ 6p	⁴ F _{7/2} ^o	20763.21	192.5	-1.2	196.2	-4	5
10	5d ³ 6p	² F _{7/2} ^o	21447.86	121.5	-35.7	-	-	

细相互作用常数。表 2 是我们的计算结果, 并与前人工作进行了比较, 在误差范围内是一致的。这种误差主要是由于扫描干涉仪及记录仪的非线性所导致的定标不精确所致。据我们所知, 对于 20197.34 cm⁻¹、21447.86 cm⁻¹ 能级的超精细结构常数 A 和 B 的报道, 这还是第一次, 其值分别为 131.5 MHz、0、121.5 MHz、-35.7 MHz。图 2 是波长为 5704.78 Å 的内调制荧光光谱, 其中位于两个公共低能级跃迁之间的谱线为交岔线, 其个数取决于跃迁谱线的公共低能级数(至于公共高能级情况, 由于低能级分裂较大, 一般不易观察到交岔线), 交岔线位于两跃迁谱线中心。表 3 是波长为 5704.78 Å 各超精细结构跃迁的测量值和计算值的比较结果, 两者是一致的, 误差也主要是由于定标不精确所产生的。

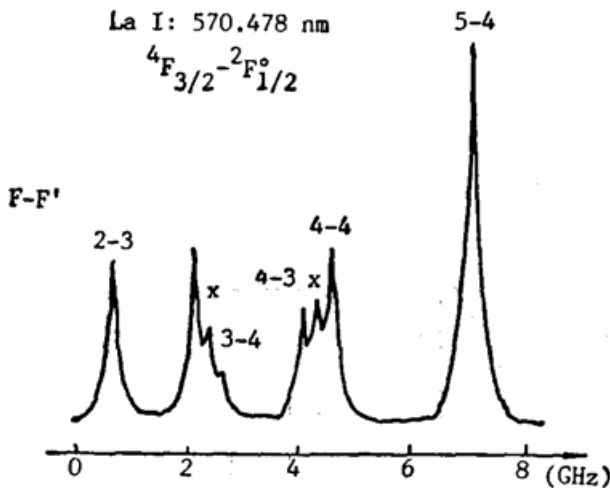


Fig. 2 Intermodulated fluorescence spectroscopy of 570.478 nm "x" stands for crossover lines

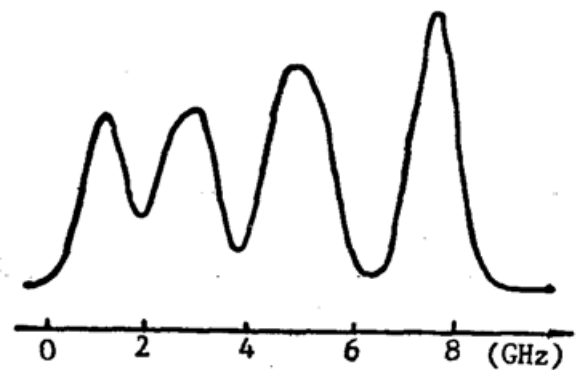


Fig. 3 Doppler-limited fluorescence spectroscopy of 574.224 nm transition line

图 3 是 5742.24 Å 未消多普勒效应的光谱图。图 4 是空心阴极灯中, 激光功率为 120 mW 时的内调制荧光光谱图, 其无多普勒效应线宽为 90 MHz, 图 5 是激光功率为 80 mW 时, 相同条件下的光谱图, 其线宽约为 40 MHz。由此可见, 激光功率对无多普勒效应信号线宽的影响是比较大的。我们认为这主要与激光功率加宽和速度转移碰撞有关。从两图比较可

Table. 3 Calculated and measured values for the hyperfine structure components of the transition ${}^4F_{3/2} - {}^2F_{1/2} (\lambda = 5704.78 \text{ \AA})$

transition F-F'	measured (MHz)	calculated (MHz)	error (MHz)
2 - 3	0	0	0
3 - 3	1445	1452	7
3 - 4	1968	1976	12
4 - 3	3367	3375	8
4 - 4	3898	3901	3
5 - 4	6279	6289	10

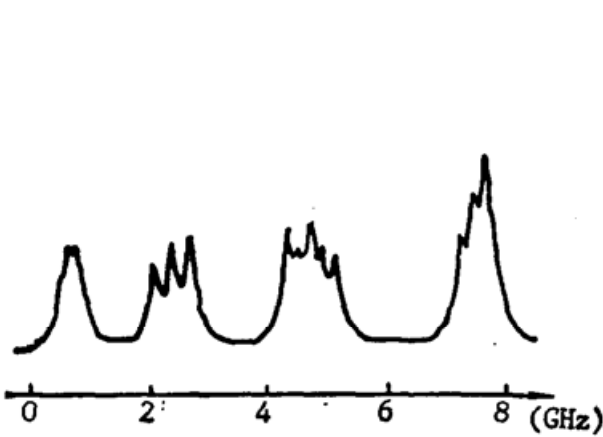


Fig. 4 Intermodulated fluorescence spectroscopy of 574.224 nm transition line for laser intensity at 120 mW

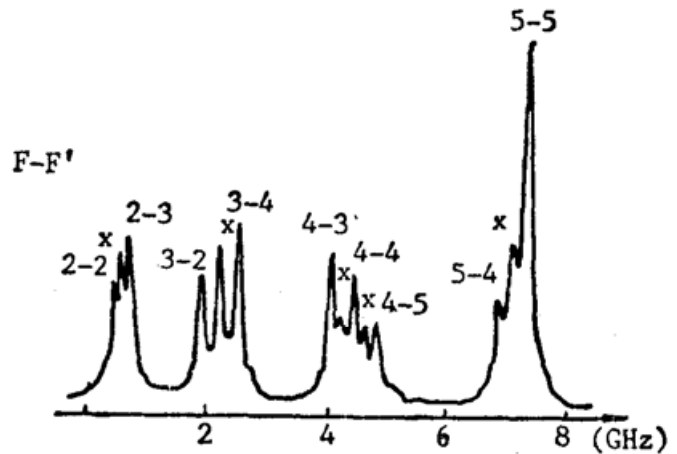


Fig. 5 Intermodulated fluorescence spectroscopy of 574.224 nm transition line for laser intensity at 80 mW "x" stands for crossover lines

知,当激光功率较强时,由于抽运速率较大,速度转移碰撞将增大,无多普勒效应信号与多普勒本底的比率将减小,即无多普勒效应信号减弱,谱线变宽。因此当激光功率较弱时,可获得较窄的线宽。表 4 是 5742.24 Å 跃迁线各超精细结构的测量值与计算值的比较结果。

Table 4 Calculated and measured values for the hyperfine structure components of the transition ${}^4F_{3/2} - {}^4F_{3/2} (\lambda = 5742.24 \text{ \AA})$

transition F-F'	measured (MHz)	calculated (MHz)	error (MHz)
2-2	0	0	0
2-3	267	273	6
3-2	1450	1451	1
3-4	2080	2086	6
4-3	3638	3650	12
4-4	4021	4013	8
4-5	4455	4461	6
5-4	6402	6405	3
5-5	6862	6854	8

在内调制光谱学中,尽管消除了多普勒加宽,但仍存在多普勒本底。我们认为这主要是由于在亚稳态原子寿命内,速度转移碰撞产生的。因此可通过减小亚稳态原子寿命,即减小速度转移碰撞来降低多普勒本底。图 6 是工作电流为 18 mA 时,跃迁波长为 5790.86 Å 的

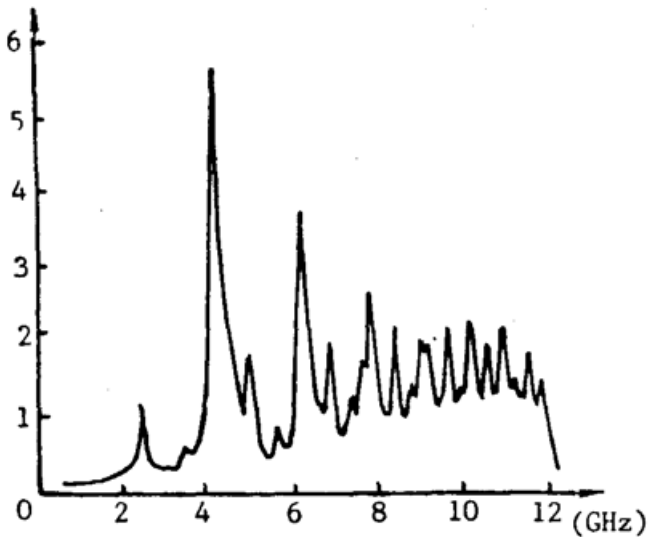


Fig. 6 Intermodulated fluorescence spectroscopy of 579.086 nm transition line at 18 mA current

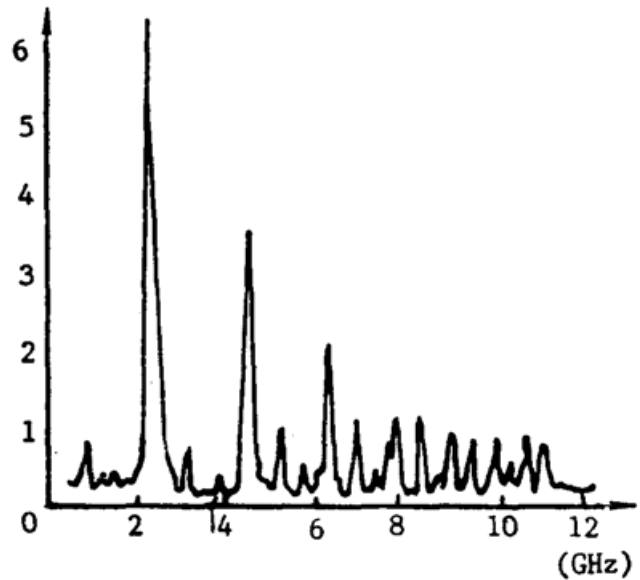


Fig. 7 Intermodulated fluorescence spectroscopy of 579.086 nm transition line at 25 mA current

内调制荧光光谱图,图7是工作电流25 mA时的光谱图。从两图比较可知,在工作电流较大时,可明显降低多普勒本底。因为随着电流增加,亚稳态原子与带电粒子(主要是电子)的非弹性碰撞将增加,导致亚稳态寿命降低,速度转移碰撞减弱,多普勒本底降低。

为了在阴极灯中得到尽可能接近自然线宽的线型,应该使用直径较大的阴极,以减少电场的影响;较低的气压以减少碰撞;适当的激光功率以减小功率加宽。这部分工作有待继续研究。

四、结 论

从我们的实验知道,利用空心阴极灯产生原子蒸气,进行光谱研究,是一种切实可行的方法。在适当条件下,改进阴极灯,可用以研究许多物理参数,这部分工作也有待继续研究。

作者感谢殷立峰、周志尧、景春阳等同志在实验中给予的帮助。

参 考 文 献

- [1] Y. Ting; *Phys. Rev.*, 1957, **108**, No. 2 (Oct), 295~304.
- [2] A. Giacchetti and M. Wilson; *J. Opt. Soc. Am.*, 1968, **58**, No. 5 (May), 740A.
- [3] A. Hese; *Z. Phys.*, 1970, **236**, No. 42 (Mar), 175~178.
- [4] W. J. Childs and L. S. Goodman; *J. Opt. Soc. Am.*, 1977, **67**, No. 10 (Oct), 1230~1234.
- [5] W. J. Childs *et al.*; *J. Opt. Soc. Am.*, 1978, **68**, No. 10 (Oct), 1348~1350.
- [6] H. O. Bechrens *et al.*; *J. Phys. (Paris)*, 1983, **44**, C7-149-168.
- [7] J. Govindarjan and T. Pramila; *J. Opt. Soc. Am.*, 1989, **B6**, No. 7 (Jul), 1275~1277.
- [8] I. I. Sobelman; "Atomic spectra and radiative transitions", (Spring-Verlag, Berlin, 1979, Germany), 157~171.
- [9] W. J. Childs and U. Nielsen; *Phys. Rev.*, 1988, **A37**, No. 1 (Jun), 6~15.
- [10] W. J. Childs and L. S. Goodman; *Phys. Rev.*, 1971, **A3**, No. 1 (Jun), 25~45.

Doppler-free spectroscopy of La I in a hollow-cathode discharge

LUO CAIYAN*, QU JIANAN, ZHU LIZHOU, LIN FUCHENG AND JIANG SHIJIE

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

(Received 14 March 1990; revised 25 April 1990)

Abstract

We used Doppler-free intermodulated fluorescence technique to study the hyperfine structure of some levels of La I in a home made La-Kr cathode discharge. The A and B constants for the levels 20197.34 cm, 21447.86 cm are reported for the first time. We observed a homogenous linewidth of less than 40 MHz and all cross-over lines between transitions with common lower levels. The spectral characteristics of a cathode discharge are investigated.

Key words: La-Kr cathode discharge; hyperfine structure; cross-over line.

* Wuhan Institute of Physics, Academia Sinica.