

$^{139}\text{La I}$ 超精细结构光谱测量*

贾列娟 景春阳 林福成

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

提 要

本文用激光光电流光谱方法研究了 $^{139}\text{La I}$ 五个奇宇称能级的超精细结构, 其中三个是首次报道。采用最小二乘拟合, 得到了这些能级的磁偶极超精细结构常数 A 。
关键词 超精细结构 $^{139}\text{La I}$ 。

1 引 言

作为稀土元素的第一种, 中性镧原子已被众多学者广泛研究。1957年, Ting 用原子束磁共振技术首次对镧原子基态的超精细结构进行了研究^[1], 随后, 人们将偶宇称能级超精细结构的研究扩展到低于 14000 cm^{-1} ^[2, 3], 并利用有效算子理论和多组态 Dirac-Fock (MODF) 从头计算法对这些结果进行了理论分析, 结果表明: 组态作用在偶宇称低能级起重要作用, 理论方法需要改进。

对于镧原子奇宇称能级, 人们也做了大量工作。最初使用的方法是用能级交叉技术或用一台法布里-珀罗干涉仪和冷阴极源^[4~7], 由于电四极超精细结构常数极小, 使用这些方法未能获得电四极常数的任何信息。1977年和1978年, Childs 和 Goodman 用高分辨率消多普勒激光-原子束技术获得了许多奇宇称能级的磁偶极常数和电四极常数^[8, 9], 随后, 人们利用多种技术获得了大量的超精细结构数据^[3, 10~13]。

尽管镧原子的超精细结构已被广泛研究, 到目前为止, 所获得的超精细结构数据还远未完整。本文的目的就在于将超精细结构数据扩展到更多的奇宇称能级。

2 实 验

实验装置如图1所示。一只自制的 La-Kr 空心阴极放电 (HCD) 管作为镧原子蒸气源, 基态和亚稳态的中性镧原子通过放电溅射来获得。管内充有约 133 Pa 氩缓冲气体, 直流放电电流约为 10 mA。一台 Ar^+ 激光器泵浦的单频可调谐连续染料激光器 (Spectra-Physics 380 D, 线宽约为 0.5 MHz) 的输出光被聚焦后射入镧阴极, 其波长用 Burleigh 公司生产的 WA-20 型波长计显示, 频率由自由光谱区为 2 GHz 的扫描干涉仪监示。光电流信号经过锁相放大器放大后由一台双笔 X-Y 记录仪记录。为了有一个频率标准和避免由于频率扫描的非线

收稿日期: 1992年3月19日

* 本课题由国家自然科学基金资助。

性带来的误差, 实验中用自由光谱区为 300 MHz 的法布里-珀罗标准具给激光频率进行标定.

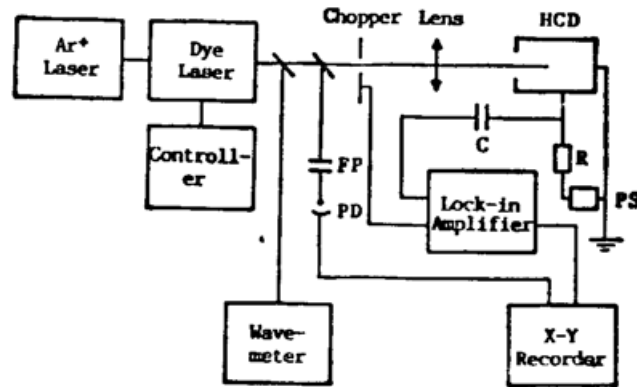


Fig. 1 Experimental arrangement

HCD—hollow-cathode discharge, FP—Fabry-Perot etalon, PD—photodiode, C—capacitor; R—resistor, PS—power supply,

3 结果与分析

图 2 为当激光波长扫过 590.593 nm 所获得的激光光电流光谱, 跃迁为 8052.16 cm^{-1} ($5d^26s^2F_{7/2}$) \rightarrow 24984.29 cm^{-1} ($J=5/2$), 图中信噪比约为 25:1, 线宽约为 700 MHz. 根据相对强度计算结果辨认的各条谱线的跃迁如图中谱线上方所示. 由于存在多普勒加宽, 每条谱线可能包含不止一个超精细结构组元, 跃迁的识别只能给出每条线宽度内包含的主要组元(相对强度最大)的跃迁. 根据谱图下方的频率标定(用作频率标定的法布里-珀罗标准具自由光谱区为 300 MHz), 可以得出各超精细结构组元间的频率间隔. $^{139}\text{La I}$ 的核自旋 $I=7/2$, 上下能级的 J 量子数为已知, 偶宇称能级的超精细结构常数已被精确确定^[8]. 利用 Casimir 公式^[14]:

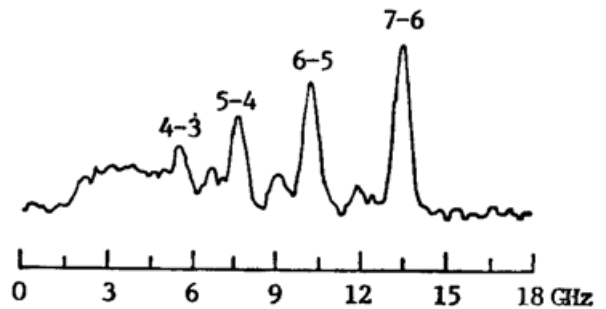


Fig. 2 Optogalvanic spectrum recorded as the laser was scanned through the line 590.593 nm

$$\Delta E = \frac{A}{2} K + \frac{B}{4} \frac{\frac{3}{2} K(K+1) - 2I(I+1)J(J+1)}{I(2I-1)J(2J-1)}$$

$$K = F(F+1) - I(I+1) - J(J+1)$$

式中 ΔE 为超精细结构的频率间隔, F 为总角动量量子数, A 、 B 分别为磁偶极常数和电四极常数, 采用最小二乘拟合, 得出上能级的磁偶极常数 $A=294(10)\text{MHz}$ (括号内的数值表示误差). 已报道过的理论和实验结果表明, 镧原子电四极常数 B 比磁偶极常数 A 小得多, 因而本文在所有的计算中将 B 近似地视为零.

图 3 为当激光波长扫过 571.239 nm 所记录的超精细结构谱图, 跃迁为 9719.44 cm^{-1} ($5d^26s^2P_{3/2}$) \rightarrow 27225.26 cm^{-1} ($5d^26p^2P_{3/2}^0$). 由于存在多普勒加宽, 每条谱线同样可能包含

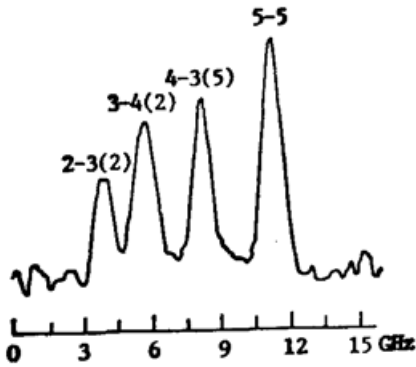


Fig. 3 Optogalvanic spectrum recorded as the laser was scanned through the line 571.239 nm

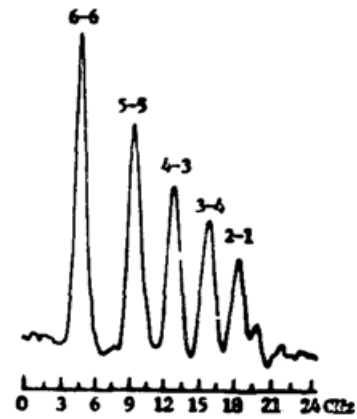


Fig. 4 Optogalvanic spectrum recorded as the laser was scanned through the line 582.916 nm

几个超精细结构组元,对这些谱线的识别也只能给出每条线宽度内包含的主要组元的跃迁.谱线上方括号内的 F 值所表示的超精细结构组元与括号外的 F 值所表示的在多普勒宽度内叠加,前者的强度稍弱.计算所得的 A 值为 $-11(17)\text{MHz}$.

为将本文结果与已有的结果进行比较,图4给出了我们用激光光电流光谱方法得到的能级 26338.93cm^{-1} (A 值已在文献[3]中报道过)的超精细结构谱图,跃迁下能级为 9183.80cm^{-1} .谱线上方标出的跃迁也只能给出每条线宽度内包含的主要组元的跃迁.计算可得 $A=111(6)\text{MHz}$,与文献[3]中的结果 100.7MHz 符合得较好.

表1总结了研究中所用到的有关数据^[15],第一列给出激光波长(真空中),以下六列分别给出上、下能级的组态、能级值和 SLJ 值.表2列出了用激光光电流光谱方法得到的 $^{139}\text{La I}$ 五个奇宇称能级的磁偶极常数 A 值,其中三个为我们首次报道.表中也给出了两个已报道过的 A 值,可以看出,本文结果与已有的结果符合得较好.

Table 1 Lines used in the present study of $^{139}\text{La I}$

$\lambda(\text{nm})$	Configuration	$E_1(\text{cm}^{-1})$	SLJ	Configuration	$E_2(\text{cm}^{-1})$	J
585.389	$5d^26s$	7679.94	$4P_{5/2}$	$5d^26p?$	24762.60	3/2
574.600	$5d^26s$	7679.94	$4P_{5/2}$	$5d^26p$	25083.36	7/2
590.593	$5d^26s$	8052.16	$2F_{7/2}$	$5d^26p?$	24984.29	5/2
582.916	$5d^26s$	9183.80	$2D_{5/2}$	$5d^26p$	26338.93	5/2
571.239	$5d^26s$	9719.44	$2P_{3/2}$	$5d^26p$	27225.26	3/2

Table 2 Magnetic-dipole hfs constants A determined for $^{139}\text{La I}$ by laser optogalvanic spectroscopy

$E_2(\text{cm}^{-1})$	$A(\text{MHz})$	
	present work	previous work
24762.60	524(28)	—
24984.29	294(10)	—
25083.36	65(2)	77(4) ^[10]
26338.93	111(6)	100.7 ^[9]
27225.26	-11(17)	—

作者感谢周志尧高工和姜士杰师傅对本实验工作的帮助.

参 考 文 献

- [1] Y. Ting, Hyperfine structure and quadrupole moment of ^{139}La , *Phys. Rev.*, 1957, **108** (2): 295~304
- [2] W. J. Childs, L. S. Goodman, Hyperfine and Zeeman studies of low-lying atomic levels of La, and the nuclear electric-quadrupole moment. *Phys. Rev. (A)*, 1971, **A3** (1): 25~45
- [3] W. J. Childs, N. Nielsen, Hyperfine structure of the $(5d+6s)^3$ configuration of ^{139}La I: New measurements and *ab initio* multiconfiguration Dirac-Fock calculations. *Phys. Rev. (A)*, 1988, **A37** (1): 6~15
- [4] A. Hese, Kernquadrupolwechselwirkung für Elektronenkonfigurationen vom Typ sd und Anwendung auf das Lanthan I-Spektrum. *Ann. Phys. (Leipz.)*, 1970, **25**: 299
- [5] A. Hese, Experimentelle Untersuchung der $5d6s6p$ $z^2F_{5,2,7/2}$ Terme im Lanthan I-Spektrum unter Verwendung von Levelcrossing Spektroskopie. *Z. Phys.*, 1970, **236** (1): 42
- [6] A. Hese, G. Büldt, Hyperfeinstruktur Stark-Effekt und Lebensdauern in den angeregten $5d6s6p$ $y^2D_{3/2, 5/2}$ Zuständen des Lanthan I Spektrums, *Z. Naturforsch.*, 1970, **25A**: 1537
- [7] W. Fischer, H. Hühnermann, K. Mandrek, Optische der hyperfeinstruktur einiger La I-Linien und Interpretation der gemessenen A-Faktoren. *Z. Phys.*, 1971, **248** (1): 53~60
- [8] W. J. Childs, L. S. Goodman, Complete resolution of hyperfine structure in the close doublet $\lambda 5930.6$ of ^{139}La by laser-atomic-beam spectroscopy. *J. Opt. Soc. Am.*, 1977, **67** (9): 1230~1234
- [9] W. J. Childs, L. S. Goodman, Hyperfine structure of excited, odd-parity levels in ^{139}La by laser-atomic-beam fluorescence. *J. Opt. Soc. Am.*, 1978, **68** (10): 1348~1350
- [10] J. Govindarajan, T. Pramila, Laser optogalvanic spectroscopy for hyperfine structure studies of La I. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1989, **B6** (7): 1275~1277
- [11] R. W. Shaw, J. P. Young, D. H. Smith *et al.*, Hyperfine structure of lanthanum at sub-Doppler resolution by diode-laser-initiated resonance-ionization mass spectroscopy. *Phys. Rev. (A)*, 1990, **A41** (5): 2566~2573.
- [12] Luo Caiyan, Qu Jianan, Zhu Lizhou *et al.*, Studies on the hyperfine structure of La I in a hollow-cathode discharge tube. *J. Phys. (D)*, 1990, **D23** (10): 1327~1328
- [13] 罗才雁, 瞿佳男, 朱利洲等. 空心阴极灯中镧原子消多普勒光谱. *光学学报*, 1990, **10** (9): 792~797
- [14] G. K. Woodgate, *Elementary Atomic Structure* (2nd ed.). Oxford: Clarendon Press, 1980: 184
- [15] W. C. Martin, R. Zalubas, L. Hagan, Atomic Energy Levels—The Rare Earth Elements. *Natl. Bur. Stand. Ref. Data Ser.*, Natl. Bur. Stand. (U. S.) Circ. No. 60 (U. S. GPO, Washington, D. C., 1978) 27~35

A new measurement on hyperfine structure of ^{139}La I

JIA LIEJUAN JING CHUNYANG LIN FUCHENG

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800)

(Received 12 March 1992)

Abstract

Laser optogalvanic spectroscopy has been performed in three new odd-parity levels and two other previously reported ones of ^{139}La I. The observed hyperfine structure spectra are analyzed and the magnetic-dipole hyperfine structure constants A of these levels are obtained by least-squares fits.

Key words hyperfine structure, ^{139}La I.