

激光诱导荧光法测量钕能级的同位素位移及超精细结构*

朱利洲 罗才雁 瞿佳男 周志尧 林福成

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海)

摘要: 本文叙述了运用稳频、单模、连续的环形染料激光同原子束垂直相互作用的方法, 对钕元素进行高分辨研究, 得到了8条钕激发态能级准确同位素位置及超精细结构常数。

Hyperfine structure and isotope shift measurements on neodymium levels by laser-induced fluorescence spectroscopy

Zhu Lizhou, Luo Zhaiyan, Qu Jianan, Zhou Zhiyao, Lin Fucheng
(Shanghai institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

Abstract: This paper describe high resolution study of neodymium using an actively stabilized c.w. ring dye laser in a crossed laser-atomic beam. Accurate values for isotope shifts in all transitions as well as for the hyperfine structure constant of 8 excited states have been obtained.

一、引言

由于稀土元素在激光分离同位素及等离子体物理、天体物理、原子物理等学科中有着重要意义, 对它的研究已经成为人们相当感兴趣的课题。

对于稀土元素钕, 已有很多人进行研究。但由于它的电子结构的特点, 其光谱极其复杂。稀土钕元素共有七个同位素, 其中 ^{143}Nd 和 ^{145}Nd 有核自旋为 $7/2$ 的超精细结构, 所以对其光谱项的识别工作相当困难, 因此关于其同位素位移及超精细结构常数的精确数据现在还很少, 故对其进行高分辨光谱的测量是非常需要的。

二、实验

实验装置如图1所示, 真空室的真空度为 7×10^{-6} Torr, 用电子枪加热装有金属钕的坩埚, 并使其蒸发的原子通过准直的狭缝。用一台连续单模、稳频的环形染料激光器 380D

* 国家自然科学基金课题。

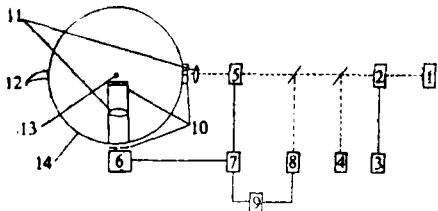


图1 测量钕能级同位素位移及超精细结构实验装置示意图

- 1—氦离子激光器 2—单模稳频环染料激光器(380D) 3—稳频的电子系统 4—六位显示波长计 5—斩波器 6—光电倍增管 7—锁相放大器 8—F-P 9—双笔记录仪 10—光闸 11—透镜 12—涂黑的伍德管 13—准直原子束 14—真空室

比为 ^{142}Nd 27.11%, ^{143}Nd 12.17%, ^{144}Nd 23.8%, ^{145}Nd 8.3%, ^{146}Nd 17.62% ^{148}Nd 5.73%, ^{150}Nd 5.62%, 其中奇同位素 ^{143}Nd , ^{145}Nd 有超精细结构, 核自旋为 $7/2$, 由于某些光谱线荧光强度较弱或超精细结构分不开, 在此我们只做了8条跃迁线, 其中之一如图2所示。下能级 $J=5$, 1128.056cm^{-1} , 上能级 $J'=4$, 17790.02cm^{-1} 。

对于偶同位素的识别较为容易, 把各同位素的丰度比对应于各条光谱线的面积之比。这样就得到了各偶同位素的位置, 并同时得到了各偶同位素之间的同位素位移, 如表1所示。

对于各奇同位素峰的识别相当困难, 如图2所示, 除五个偶同位素以外, 对应于 ^{143}Nd , ^{145}Nd 超精细结构的峰共有42条之多, 要全部识别出来是非常困难的。用下面的办法, 我们也只能识别其中的一部分。

基态和激发态之间超精细结构跃迁线的强度对应于

$$I(F-F') \propto (2F+1)(2F'+1) \frac{J}{F'} \frac{F}{J'} \frac{I^2}{I'}$$

式中, J 为电子角动量子数, I 为核角动量子数, F 为总角动量子数。

(Spectra Physics公司生产)作为原子的激发源, 染料为R6G。同时用波长计观测其波长(波长计为Buleigh公司出产)并用F-P监测其频率。染料激光器输出的功率为 $100\text{mW} \sim 150\text{mW}$ 。氦离子激光器输出的功率为 4W 左右。染料激光经长焦距透镜适当聚焦, 能量密度小于 $100\text{W}/\text{cm}^2$ 以避免饱和增宽。激光经光阑进入真空室, 并同原子束横向作用。真空室内全部染黑以减小杂散光引起的噪声。在与激光束垂直的方向上, 光电倍增管通过透镜接收原子跃迁产生的荧光, 信号经锁相放大器放大, 然后用双笔记录仪记录。

三、结果和分析

稀土钕元素共有七个同位素, 各自的丰度

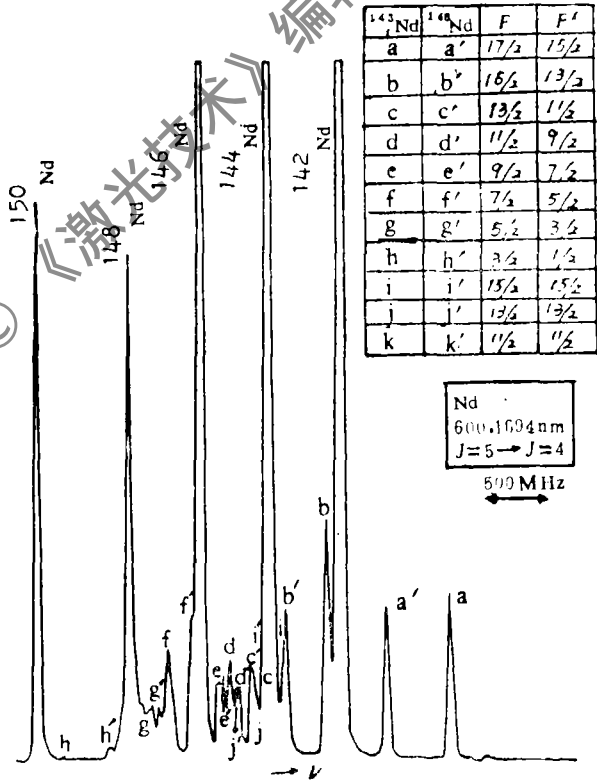


图2 Nd $1128.056 \sim 17790.018\text{cm}^{-1}$ 的吸收谱

表 1 同位素位移

波 长 (nm)	基态 J	基态能级 (cm ⁻¹)	激发态 J	激发态能 级(cm ⁻¹)	同位素位移(MHz)			
					¹⁵⁰ Nd- ¹⁴⁸ Nd	¹⁴⁸ Nd- ¹⁴⁶ Nd	¹⁴⁶ Nd- ¹⁴⁴ Nd	¹⁴⁴ Nd- ¹⁴² Nd
588.950	4	0	3	16979.35	106.7	198.6	228.5	219.3
567.750	5	1128.056	5	18741.337	-1191.4	-704.8	-570.7	-648.7
600.169	5	1128.056	4	17790.018	+1046.7	818.7	780.7	832.5
601.657	5	1128.056	6	17748.82	741.3	636.2	596.5	641.4
593.653	4	0	5	16844.84	1165.4	958.5	858.5	972.3
587.125	4	0	4	17032.15	424.1	555.1	517.2	565.5
582.651	4	0	5	17162.93	127.5	234.4	262.1	258.6
582.196	5	1128.056	5	18304.4	89.6	203.4	234.5	241.36

根据上述公式,算出的结果基本为:若J→J+1,则F→F+1为强线,F→F次之,F→F-1再次之;若J+1→J,则F+1→F为最强,F→F次之,F-1→F再次之;若J→J,则F→F为最强。

根据以上结果,基本能确定某些较弱的跃迁线,同时得到各线之间的频率差,并把其代入以下公式。

表 2 超精细结构常数

能 级(cm ⁻¹)	A(MHz)		B(MHz)	
	¹⁴⁵ Nd	¹⁴³ Nd	¹⁴⁵ Nd	¹⁴³ Nd
0	-121.61	-195.71	64.73	122.62
16979.35	-37.85	-60.56	-19.2	-29.8
18741.337	-96.432	-148.32	16.43	26.48
17790.018	-48.752	-76.859	2.32	11.84
17748.82	-89.353	-112.47	8.57	12.32
16844.84	-53.427	81.396	5.32	9.47
17032.15	-74.374	-98.432	7.68	10.57
17162.93	-145.83	-213.61	25.63	48.49
18304.4	-64.73	-94.32	7.54	13.24

$$\Delta\omega_{F'-F} = \omega_{J'} - \omega_J + \frac{C'}{2} A' + \frac{3C'(C'+1) - 4I(I+1)J'(J'+1)}{8I(2I-1)J'(2J'-1)} B'$$

$$- \frac{C}{2} A - \frac{3C(C+1) - 4I(I+1)J(J+1)}{8I(2I-1)(2J-1)} B$$

式中, $C' = F'(F'+1) - I(I+1) - J'(J'+1)$

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

A' 、 A 、 B' 、 B 分别为激发态和基态的磁偶极矩常数和电四极矩常数。跃迁满足选择定则 $\Delta J = 0, \pm 1$, $\Delta F = 0, \pm 1$, $\Delta M = 0, \pm 1$ 。

然后用最小二乘法算出 A 、 B 、 A' 、 B' , 具体数据如表2所示。

四、总 结

我们总共测了8条跃迁谱线的同位素位移和超精细结构, 测出的同位素位移对于在假定组态的能级以及在有许多能级混合在一起的情况下, 确定各能级组态的位置是有较大帮助的。算出的各超精细结构常数, 对于以后在激光分离同位素中选择适当的谱线, 以及一些理论计算是必不可少的。

参 考 文 献

- [1] Ahn S A et al., Spectrochim Acta. (B), 1981; 36(10): 943~950
- [2] Nikl H et al., Opt. Commun., 1988; 70(1): 16~20
- [3] Cheng K I et al., Phys. Rev. (A), 1985; 31: 2775~2784
- [4] Yin L et al., Chem. Phys., 1984; 4: 886~888

* * *

作者简介: 朱利洲, 男, 1965年10月出生。研究实习员。从事原子光谱工作。

罗才雁, 男, 1964年4月出生。研究生。现从事激光光谱学工作。

瞿佳男, 男, 1963年11月出生。博士生。现从事激光光谱学工作。

周志尧, 男, 1936年4月出生。高级工程师。从事激光同原子相互作用研究。

林福成, 男, 1936年9月出生。研究员。

收到修改稿日期: 1990年3月29日。

· 简 讯 ·

中国光学学会青年工作委员会第四届年会

1990年10月中国光学学会青年工作委员会在广州举办中国光学学会青年工作委员会第四届年会, 交流青年科技工作者的研究成果。

(摘自学会活动计划)