

142—146, 148, 150Nd⁺ 同位素位移的共线快离子束-激光 光谱学实验研究*

马洪良

(上海大学物理系, 上海 200436)

汤家镛

(复旦大学现代物理研究所, 上海 200433)

(2000 年 8 月 20 日收到)

原子光谱中, 同位素位移是少数几个能够将原子物理学和原子核物理学这两个不同的物理学分支联系起来的课题之一. 本文利用共线快离子束-激光光谱学方法, 测量了正一价铈离子所有 7 个稳定同位素 ($A = 142-146, 148, 150$) 之间的能量位移. 与已有的结果比较, 测量精度提高了一个数量级.

关键词: 同位素位移, 快离子束-激光光谱学

PACC: 3280, 3290

1 引 言

原子物理学和原子核物理学是物理学中两个充满活力的独立分支. 原子光谱中, 同位素位移是少数几个能够把这两个不同分支联系起来的课题之一. 同位素位移不仅可用来估算非纯态的组态混合比和检验计算电子屏蔽效应^[1, 2], 而且可以推导核电荷分布的基本信息^[3]. 近几十年来, 激光器技术和计算机的发展大大推动了该课题的迅速发展, 测量精度在不断地提高, 提供了更多的物理信息.

每个元素都有其特征光谱线, 并且同位素对于每条光谱线的能量都有微小的影响, 这种由于同位素质量不同引起的能量差被称之为同位素位移, 它包括质量位移和场位移^[4]. 几个实验小组测量了稀土元素铈的同位素位移. Ahmad 等人采用装有浓缩同位素、液氮制冷的中空阴极灯作为光源, 利用法布里-珀罗光谱学测量了正一价铈离子 $A = 142$ 和 144 的同位素位移^[5]; Blaise 小组采用装有按照比例 81:19 混合的铈同位素 ($A = 144, 150$) 碘化物的无电极管作为光源, 利用傅里叶变换光谱学方法测量了这两个同位素的光谱位移^[6]. 上面两种测量方法都存在着多普勒展宽, 由此引起的误差大于数 mK ($1\text{mK} = 10^{-3}\text{cm}^{-1}$).

此前, 作者已报道了利用无多普勒展宽的共线快离子束-激光光谱学装置测量了波长分别为 568.9, 570.8, 572.7 和 574.1 nm 等光谱线的铈离子 5 个偶同位素 ($A = 142-150$) 的同位素位移^[7]. 由于当时实验条件限制, 没有得到 $^{143}\text{Nd}^+$ 和 $^{145}\text{Nd}^+$ 共振光谱, 还有许多工作需要进一步完成.

本文在引进新的激光器系统基础上, 进一步完善了共线快离子束-激光光谱学装置, 测量了正一价铈离子全部 7 个稳定同位素 ($A = 142-146, 148, 150$) 的共振光谱.

2 实验装置及研究内容

图 1 为实验装置示意图, 具有单横模、自动扫描等特点的激光器 (CR899-29, Coherent Int.) 提供波长可连续调谐的激光, 波长范围为 560—620 nm (染料为罗丹明 6G). 它与来自小型同位素分离器 (Danfysik 1080-30) 单能、同位素纯的离子束反方向共线, 离子在后加速区域实现共振激发. 利用单色仪和光电倍增管 (EMI-9789B) 的组合记录退激的荧光光子. 本实验主要包括如下改进: 新的激光器系统运行更加稳定, 增加了法布里-珀罗干涉仪 (FPI, 自由光谱范围为 146.5 nm), 它与激光的碘吸收谱结合, 精确确定多道谱中道数与激光频率的绝对关系; 在单

* 国家自然科学基金 (批准号: 19874015) 资助的课题.

色仪入口端增加滤色片组合,有效地消除了本底荧光的影响;制备新的钕氯化物,作为中空离子源(Danfysik911A)的装料,通过摸索出束条件,得到流强大、稳定的束流,测量系统同时在线记录来自退激荧光光子信号、激光通过法布里-珀罗干涉仪和通过碘蒸气的光子信号.

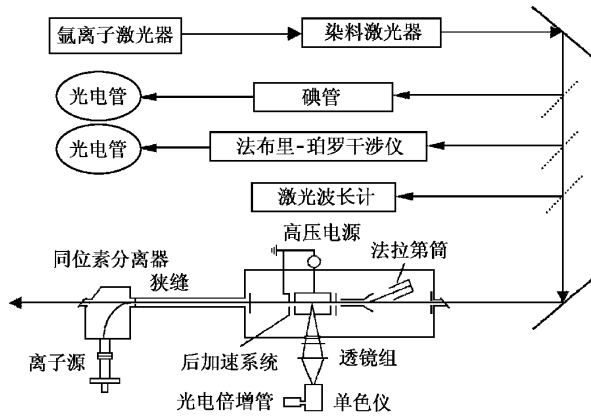


图 1 共线快离子束-激光光谱学装置示意图

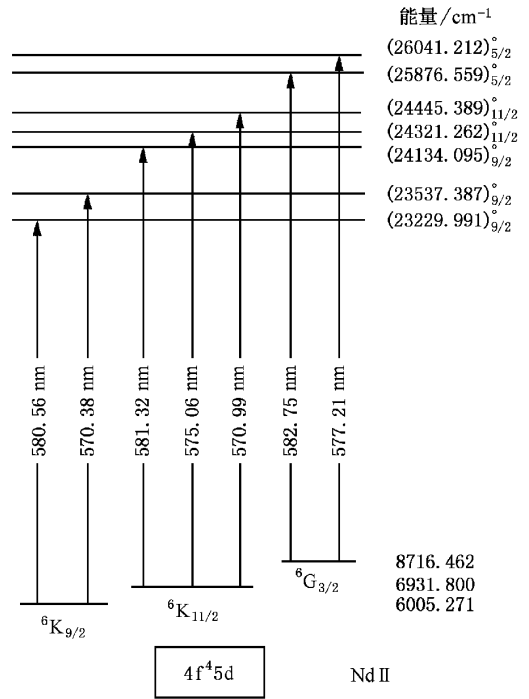


图 2 Nd II 部分能级图

对于稀土元素,能级十分密集,谱线很丰富.图 2 给出本文研究的正一价钕离子部分能级图.激光选择性地抽运处于亚稳态的离子到激发态,一般存在很多退激通道,选择记录通道的依据是,退激荧光波长与抽运激光波长相差较大,可以有效地消除杂散激光引起的本底,退激荧光波长应在光电倍增管的灵敏范围,最好在灵敏度峰值附近,对于 EMI-9789B 光电倍增管,选择记录的荧光波长范围为 370—450 nm.

3 实验结果与讨论

图 3 为谱线波长为 577.21 nm 正一价钕离子的共振荧光光谱图.图中上部分对应激光的碘吸收谱,根据图中 6 个碘吸收特征峰的道数和频率^[8],并结合激光通过法布里-珀罗干涉仪的干涉谱,精确确定每个共振峰的频率.

钕 5 个偶同位素的核自旋都为零,只存在由于

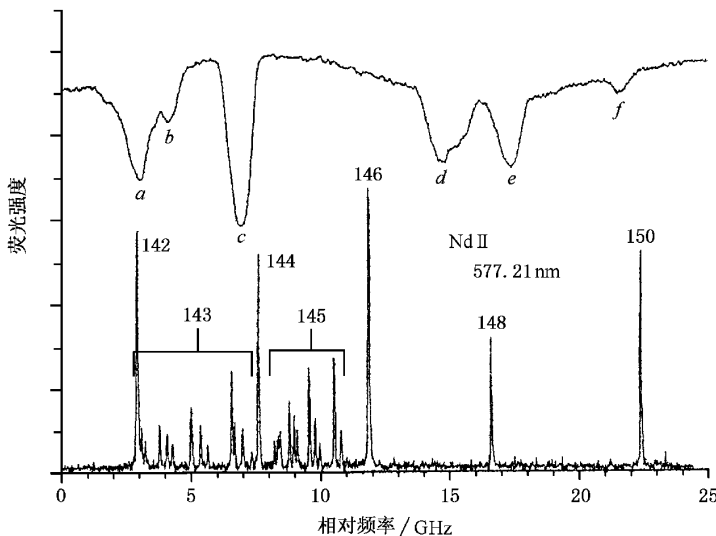


图 3 谱线波长为 577.21 nm 正一价钕离子的共振荧光谱

同位素质量不同引起的能级分裂,而对于两个奇钕同位素 $A = 143$ 和 145 核自旋都为 $7/2$, 因此,还存在超精细相互作用,它引起能级的进一步分裂.对于波长为 577.21 nm 的谱线,亚稳态能级电子总量子数为 $3/2$, 耦合总量子数为 $5, 4, 3, 2$; 激发态能级电子总量子数为 $5/2$, 耦合总量子数为 $6, 5, 4, 3, 2, 1$.

存在 12 个跃迁,在图 3 中可以分辨每个跃迁.

表 1 列出正一价钕离子全部 7 个稳定同位素 ($A = 142-146, 148, 150$) 之间的能量位移,测量误差小于 0.8 mK , 主要包括由于确定碘吸收特征峰和共振峰的位置引入的误差和同位素分离器加速电压的为微小波动引入的误差.

表 1 $^{142-146, 148, 150}\text{Nd}^+$ 同位素位移 (mK)

λ/nm	582.75	577.21	580.56	570.38	581.32	575.06	570.99
142—144	64.0	70.8	40.7	45.9	42.2	46.4	51.9
144—146	59.6	58.6	37.0	41.0	38.2	42.9	45.0
146—148	67.9	76.2	44.3	49.0	45.9	51.0	53.3
148—150	102.6	113.4	66.9	73.1	68.6	77.9	79.2
142—143	24.1	29.8	18.65	27.4	23.7	20.2	13.8
144—145	17.7	25.4	14.0	26.5	18.1	14.2	16.2

表 2 同时列出 Ahmad 等人^[5]和 Blaise 小组^[6]的实验结果,他们的测量误差大于几个 mK. 可以看出,在测量误差范围内,本文的测量结果与他们的结

果一致,测量精度提高了一个数量级,并且得到了其他同位素之间的能量位移,这部分数据尚未见报道.

表 2 正一价钕离子 $A = 142$ 和 144 , $A = 144$ 和 150 之间的同位素位移 (mK) 与已发表数据的比较

λ/nm	低能级	高能级	本工作		Ahmad ^[5]	Blaise ^[6]
			142—144	144—150	142—144	144—150
582.75	8716.462	25876.559	64.0	230.1		224
577.21	8716.462	26041.212	70.8	248.1		242
580.56	6005.270	23229.990	40.7	148.1	39	142
570.38	6005.270	23537.390	45.8	163.1	43	170
581.32	6931.800	24134.095	42.2	142.7	40	141
575.06	6931.800	24321.262	46.4	171.7	48	169
570.99	6931.800	24445.389	51.9	177.5	51	183

[1] W.K. King, Isotope Shifts in Atomic Spectra (Plenum, New York, 1984), Chap. 6.

[2] H.L. Ma et al., *J. Phys.*, **B30**(1997), 3355.

[3] M. Wakasugi et al., *J. Phys. Soc. Jpn.*, **59**(1990), 2700.

[4] H.L. Ma et al., *Acta Physica Sinica (Overseas Edition)*, **7**(1998), 572.

[5] S.A. Ahmad et al., *Spectrochim. Acta*, **B36**(1983), 943.

[6] J. Blaise et al., *Phys. Scr.*, **29**(1984), 119.

[7] H.L. Ma et al., *Chin. Phys. Lett.*, **6**(1999), A11.

[8] S. Gerstenkon et al., Atlas du Spectra d'Absorption de la Moleculéd'Iode (CNRS, Paris, 1978).

MEASUREMENT OF ISOTOPE SHIFTS AMONG $^{142-146, 148, 150}\text{Nd}^+$ BY USING COLLINEAR FAST-ION-BEAM LASER SPECTROSCOPY*

MA HONG-LIANG

(*Department of Physics, Shanghai University, Shanghai 200436, China*)

TANG JIA-YONG

(*Institute of Modern Physics, Fudan University, Shanghai 200433, China*)

(Received 20 August 2000)

ABSTRACT

In atomic spectroscopy, the subject of isotope shifts is one of the few problems that links atomic and nuclear physics. The isotope shifts among all the seven stable isotopes in Nd II were measured by means of collinear fast-ion-beam laser spectroscopy. Compared with the data that have been published, our experimental accuracy is improved by one order of magnitude and some of the results are obtained for the first time, as far as we know.

Keywords : isotope shifts, fast-ion-beam laser spectroscopy

PACC : 3280, 3290

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 19874015).