

文章编号: 0253-2239(2010)04-1036-05

# 钠原子 $D_2$ 线无多普勒饱和荧光光谱的测量

闫召爱<sup>1,2</sup> 胡 雄<sup>1</sup> 郭商勇<sup>1</sup> 程永强<sup>1</sup> 吴小成<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院空间科学与应用研究中心, 北京 100190; <sup>2</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要** 建立了用于测量钠原子光谱的无多普勒饱和荧光光谱测量系统。在该系统中使用了线宽约 100 kHz 的窄线宽染料激光器和光电二极管探测器。钠泡温度控制在 65 °C。两束相向传播的激光束在钠泡中重叠共同激发荧光。光电二极管被放置在钠泡的侧面接收、探测激发的荧光。LabVIEW 软件控制的数据采集卡采集光电二极管的信号。通过扫描染料激光器的激光频率, 可以观测到钠原子的无多普勒特征  $D_{2a}$ , 交叉共振以及  $D_{2b}$ 。当激光频率扫描的步长约为 2 MHz 时, 在实验中观测到了  $D_{2a}$  中的三条谱线。

**关键词** 光谱学; 超精细光谱; 饱和荧光; 钠原子

中图分类号 O433.1; O562

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS20103004.1036

## Sodium Atoms $D_2$ Line Doppler-Free Saturation Fluorescence Spectra Measurements

Yan Zhaoai<sup>1,2</sup> Hu Xiong<sup>1</sup> Guo Shangyong<sup>1</sup> Cheng Yongqiang<sup>1</sup> Wu Xiaocheng<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)  
(<sup>2</sup> Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** The Doppler-free saturation fluorescence spectra system is set up. 100 kHz narrow-band dye laser and photodiode are used in this system. Two counterpropagating dye laser beams overlap on a Na cell whose temperature is set at 65 °C. And a photodiode located at one side of the Na cell collects and detects the excited fluorescence. Then photodiode signal is sampled by data acquisition card which is controlled by LabVIEW software. Doppler-free features  $D_{2a}$ , crossover and  $D_{2b}$  are observed by scanning the dye laser frequency. When the dye laser frequency scan step is about 2 MHz, three lines in the  $D_{2a}$  can be observed in this experiment.

**Key words** spectroscopy; hyperfine spectra; saturation fluorescence; sodium atom

### 1 引 言

钠荧光测温测风激光雷达通过测量钠原子谱线的多普勒频移和展宽, 实现对中间层顶(约 75 ~ 120 km)处大气的温度、风场以及钠原子分布等的探测。该激光雷达要求将窄线宽激光的频率稳定在某一绝对频率上。为此, 可以利用钠原子的无多普勒饱和特征作为频率的参考基准进行激光器频率稳定。1971 年 Hänsch 等<sup>[1]</sup>使用脉冲染料激光器实现了钠原子无多普勒饱和吸收光谱的测量。1985 年 Hu 等<sup>[2]</sup>对钠原子的饱和吸收光谱进行了研究。1991 年 Fujii 等<sup>[3]</sup>测量了饱和和荧光光谱。1992 年 She 等<sup>[4,5]</sup>对钠原子无多普勒饱和和荧光光谱进行了

详细介绍, 给出了  $D_{2a}$  和  $D_{2b}$  线的计算和测量结果, 并将其应用到了对中间层顶处大气温度、风场等激光雷达观测中。

在建立中国科学院空间科学与应用研究中心的钠荧光测温测风激光雷达过程中, 自主研制了钠原子无多普勒饱和和荧光稳频系统。为了利用该系统将激光频率稳定在钠原子无多普勒饱和和特征处, 对钠原子  $D_2$  谱线的无多普勒饱和和荧光谱进行了观测实验。

### 2 实验原理

钠原子 D 线能级分布图如图 1 所示。钠原子基

收稿日期: 2009-04-22; 收到修改稿日期: 2009-06-25

基金项目: 国家自然科学基金(40774087)和中国科学院知识创新工程重要方向性项目(KJXC2-YW-T13-2)资助课题。

作者简介: 闫召爱(1981—), 男, 博士研究生, 主要从事激光雷达方面的研究。E-mail: yanza@126.com

导师简介: 胡 雄(1967—), 男, 博士, 研究员, 主要从事中高层大气方面的研究。E-mail: xhu@cssar.ac.cn

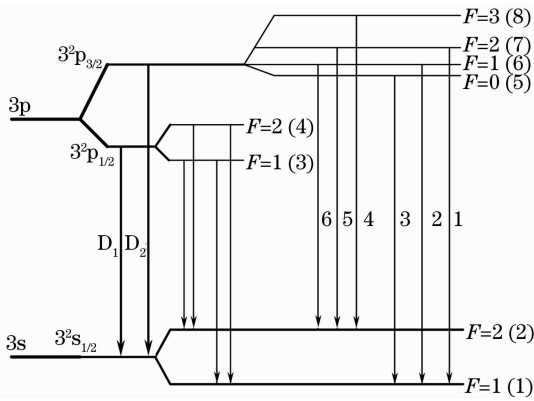


图 1 钠原子 D 线跃迁能级分布图

Fig. 1 Energy-level diagram of sodium D line transitions

态的电子组态是  $1s^2 2s^2 2p^6 3s^1$ , 即价电子处于  $3^2 s_{1/2}$  能级。钠原子的第一激发态是价电子激发到 3p 能级, 由于自旋轨道耦合, 3p 能级分裂为两条,  $3^2 p_{3/2}$  和  $3^2 p_{1/2}$ 。这两条能级上的电子往基态跃迁, 就产生钠黄

线<sup>[6]</sup>, 即 D<sub>2</sub> 线:  $3^2 p_{3/2} \rightarrow 3^2 s_{1/2}$ , 波长为 589.158 nm; D<sub>1</sub> 线:  $3^2 p_{1/2} \rightarrow 3^2 s_{1/2}$ , 波长为 589.756 nm。对于超精细结构,  $3^2 p_{3/2}$ ,  $3^2 p_{1/2}$  分别分裂为 4 个和 2 个能级。D<sub>2</sub> 线超精细结构主要参数如表 1 所示。

表 1 钠原子 D<sub>2</sub> 线超精细跃迁参数Table 1 Parameters of Hyperfine Transitions of the Na D<sub>2</sub> line

Group	Transition $n$	Offset $\nu_n$ /GHz	Relative line strength $A_n$
D <sub>2b</sub>	1	1.0911	5/32
	2	1.0566	5/32
	3	1.0408	2/32
	4	-0.6216	14/32
D <sub>2a</sub>	5	-0.6806	5/32
	6	-0.7150	1/32

频率偏移  $\nu_n$  表示第  $n$  条谱线的相对位置, 相对线强度  $A_n$  表示第  $n$  条谱线的相对强度。

钠原子 D<sub>2</sub> 跃迁的速率方程可以写为

$$dN_1/dt = -(W_{15} + W_{16} + W_{17} + \Gamma)N_1 + (W_{51} + A_{51})N_5 + (W_{61} + A_{61})N_6 + (W_{71} + A_{71})N_7 + \Gamma N_{01}, \quad (1)$$

$$dN_2/dt = -(W_{26} + W_{27} + W_{28} + \Gamma)N_2 + (W_{62} + A_{62})N_6 + (W_{72} + A_{72})N_7 + (W_{82} + A_{82})N_8 + \Gamma N_{02}, \quad (2)$$

$$dN_5/dt = W_{15}N_1 - (A_{51} + W_{51} + \Gamma)N_5, \quad (3)$$

$$dN_6/dt = W_{16}N_1 + W_{26}N_2 - (A_{61} + W_{61} + A_{62} + W_{62} + \Gamma)N_6, \quad (4)$$

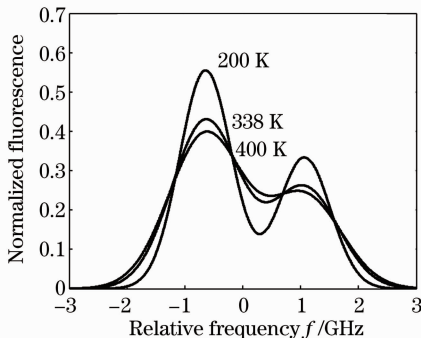
$$dN_7/dt = W_{17}N_1 + W_{27}N_2 - (A_{71} + W_{71} + A_{72} + W_{72} + \Gamma)N_7, \quad (5)$$

$$dN_8/dt = W_{28}N_2 - (A_{82} + W_{82} + \Gamma)N_8, \quad (6)$$

式中  $N_i$  表示能级  $E_i$  上的粒子数,  $W_{ij}$  表示受激吸收或发射几率,  $A_{ij}$  表示上能级  $E_i$  向下能级  $E_j$  的自发辐射几率,  $\Gamma$  是无辐射跃迁几率,  $N_{01}$ ,  $N_{02}$  分别是平衡态状态下的能级  $E_1$ ,  $E_2$  上的粒子数。荧光的发射几率可以由下式给出

$$R = nA_0/N_0, \quad (7)$$

式中  $n$  表示激发态上的粒子数,  $A_0$  表示总的自发辐射几率,  $N_0$  表示总粒子数。求解(1)~(6)式, 可以得到荧光的发射几率  $R$ 。它是频率  $\nu$ 、入射光强度  $I$  等的函数。

图 2 钠原子 D<sub>2</sub> 线多普勒展宽的荧光光谱Fig. 2 Doppler-broadened fluorescence spectra of Na D<sub>2</sub>

当计算荧光光谱的线型, 还需要考虑原子的热运动引起的多普勒展宽。图 2 给出温度为 200 K, 338 K 和 400 K 时钠原子 D<sub>2</sub> 线多普勒展宽的荧光光谱。

饱和光谱是基于原子(分子)速度选择的能级跃迁饱和光谱<sup>[8]</sup>。当采用两束光强相等相向传播的光进行测量时, 如图 3 所示, 一束为抽运光  $E_0 \cos(\omega t - kz)$ , 一束为探测光  $E_0 \cos(\omega t + kz)$ 。这两束光在多普勒分布曲线上烧出两个 Bennet 孔。两个孔分别位于  $u_z = (\omega_0 - \omega)/k$  和  $u_z = -(\omega_0 - \omega)/k$  处。当入射光

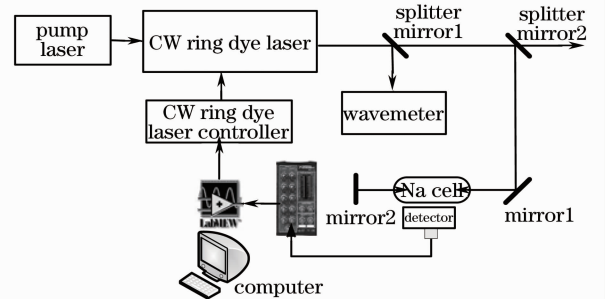


图 3 钠原子饱和荧光光谱测量系统

Fig. 3 Configuration of sodium Doppler-free saturation fluorescence spectroscopy measurement system

的频率  $\omega$  接近布居数速度分布曲线的中心频率  $\omega \rightarrow \omega_0$ , 两孔将在  $u_z = 0$  处合并, 在荧光谱线上出现一个凹陷区, 如图 4 所示, 称为拉姆凹陷。拉姆凹陷不受多普勒效应影响, 又称为无多普勒(Doppler-free)凹陷。在  $\omega = \omega_0$  处出现拉姆凹陷是两束光对

同一群分子共同作用引起吸收饱和的结果<sup>[9]</sup>。通常, 饱和光谱又被称为拉姆凹陷光谱<sup>[8]</sup>。若两个跃迁  $\omega_1$  和  $\omega_2$  公用一个能级, 多普勒线宽  $\Delta\omega_D$  大于  $\omega_1 - \omega_2$ , 则在频率  $(\omega_1 - \omega_2)/2$  处观测到交叉共振(Crossover), 如图 4 所示。

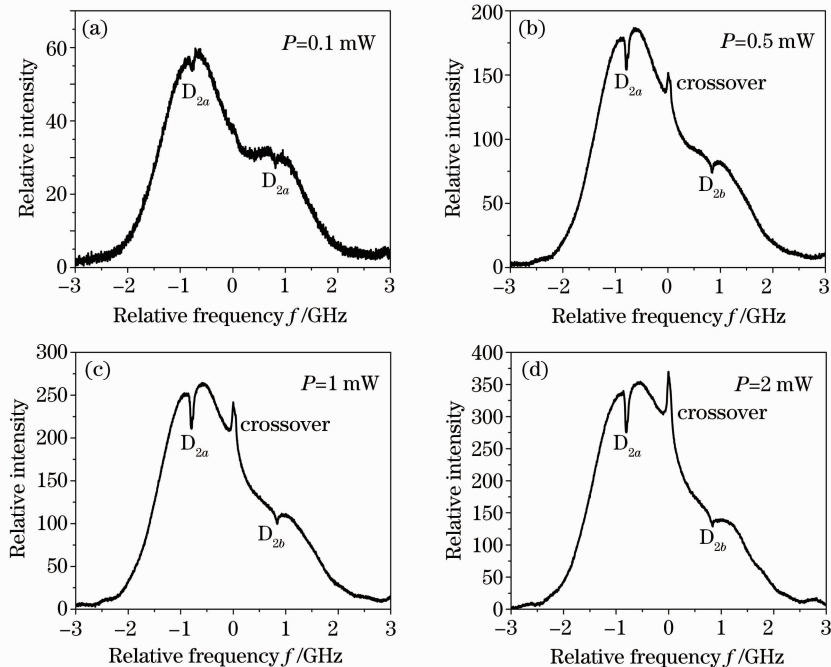


图 4 不同激光功率下测量的钠  $D_2$  无多普勒饱和和荧光光谱

Fig. 4 Measured Doppler-free saturation fluorescence spectra of sodium  $D_2$  with different laser powers

考虑了能级跃迁饱和以及热运动作用后的钠原子荧光几率可以写为<sup>[4]</sup>

$$F(\nu, I) = \int \lambda_0 \sqrt{\frac{m}{2\pi k_B T}} \exp\left(-\frac{m\lambda_0^2 z^2}{2k_B T}\right) R(\nu, z, I) dz, \quad (8)$$

$$R(\nu, z, I) = \frac{R_s I}{I + I_s}, \quad (9)$$

式中  $z = \nu/\lambda_0$ ,  $\nu$  为原子运动的速率,  $\lambda_0$  为入射光的中心波长,  $T$  为温度,  $m$  为原子质量,  $k_B$  为波尔兹曼常数,  $R_s$  为饱和荧光发射几率,  $I_s$  为饱和激光强度,  $I$  为入射激光强度。

### 3 实验装置

利用窄线宽环形染料激光器和钠泡建立了钠原子饱和和荧光光谱测量系统。该系统主要包括窄线宽环形染料激光器、钠泡和数据采集系统等, 如图 3 所示。

连续环形染料激光器使用 Rhodamine 590 作为染料, 输出波长范围约为 570~630 nm。激光腔里面配有双折射滤光片与标准具用于压缩线宽, 输出线宽 100 kHz; 另外使用外部参考腔与 Poud-Drever-Hall

频率锁定技术稳定激光器频率。可以通过计算机控制激光的频率扫描。钠原子泡直径 25 mm, 长度 75 mm, 由温控器控制钠泡的温度。实验中设定温度为 65 °C, 控制精度为 0.1 °C。整个钠泡封闭在盒子里, 以避免钠泡体内外温度差别过大引起钠原子的凝结。探测器使用快速光电二极管, 上升时间约为 1 ns。数据采集卡采用 NI 公司的 NI 6251 采集卡, 最大采样率 1.25 MS/s。数据采集软件由 LabVIEW 语言编写。另外, 波长计 EXFO-WA 1500 用于监测激光器频率, 初步确定钠原子  $D_2$  线的位置, 其精度是  $\pm 60$  MHz。

激光经分束镜 2 和反射镜 1 进入钠泡, 遇到反射镜 2 后反射回来, 形成了两束相向运行的激光束, 能量近似相等。探测器在侧面接收钠原子荧光, 然后由计算机采集数据。

### 4 实验结果

利用不同强度的入射光进行了测量, 所使用的激光功率分别为 0.1, 0.5, 1 和 2 mW, 光斑直径约 1.5 mm。激光器的频率扫描步长约为 2 MHz。

图 4 给出了测量得到的钠原子  $D_2$  线无多普勒饱和荧光光谱。从图 4 发现,随着激光功率的增加,荧光的强度也增加,无多普勒饱和特征可以明显看出。 $D_{2a}$  与  $D_{2b}$  之间的频率差约为 1.7 GHz。在  $D_{2a}$  与  $D_{2b}$  之间有交叉共振(crossover),并且随着入射光强增加而增强。当激光功率为 0.1 mW 时,无多普勒的饱和特征比较不明显,但可以清楚地看出钠原子  $D_2$  线荧光的双峰结构。当激光功率为 0.5 mW 时, $D_{2a}$  拉姆凹陷的峰值与谷值分别为 185 和 155,其大小为 30。当激光功率分别为 1,2 mW 时, $D_{2a}$  拉姆凹陷的大小分别约为 55 和 75。

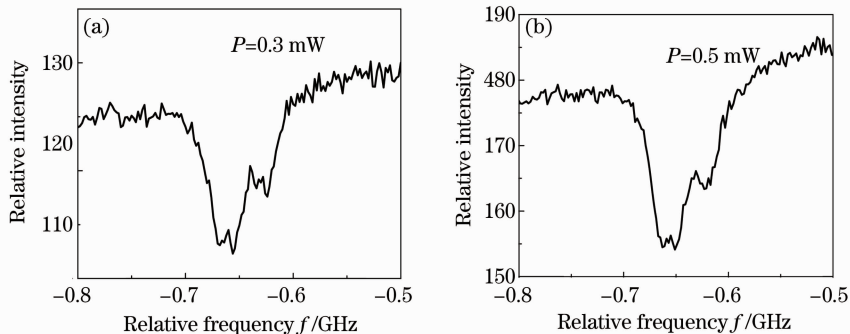


图 5 测量的钠  $D_{2a}$  无多普勒饱和和荧光光谱

Fig. 5 Measured Doppler-free saturation fluorescence spectra of sodium  $D_{2a}$

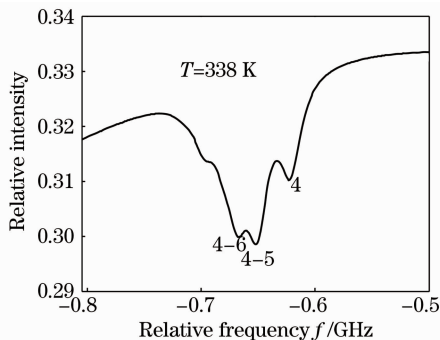


图 6 模拟的钠  $D_{2a}$  无多普勒饱和和荧光光谱

Fig. 6 Simulated Doppler-free saturation fluorescence spectra of sodium  $D_{2a}$

利用钠原子无多普勒饱和荧光光谱系统研制了激光器稳频系统,将激光中心频率长期稳定在钠  $D_{2a}$  饱和特征处,稳定精度约 4 MHz。

## 5 结 论

建立了钠原子无多普勒饱和荧光测量系统,对 65 °C 的钠原子泡进行测量,获得了  $D_2$  线的无多普勒饱和和荧光光谱。在激光频率扫描步长约为 2 MHz 时,可以观测到  $D_{2a}$  中的三条谱线。实验中,分辨出相距约 20 MHz 的两条谱线。钠  $D_2$  线的无多普勒

图 5 为  $D_{2a}$  中的三条精细谱线的展开图。这三条精细谱线的相对频率分别是 0.62, 0.65 与 0.67 GHz。它们是跃迁 4,4-5 的交叉共振以及 4-6 的交叉共振产生的。跃迁 5 和 6 产生的谱线,由于比较弱,没有被观测到。激光功率为 0.5 mW 时观测到的谱线比激光功率为 0.3 mW 时观测到的谱线信噪比大一些。但是如果入射激光的功率比较大,这三条谱线会因功率展宽作用而模糊。图 6 是钠  $D_{2a}$  谱线的理论计算结果。通过比较图 5 和图 6,可以看出该实验结果可以很好地分辨出两条相距约 20 MHz 的谱线。

饱和荧光光谱提供了精确的绝对频率标准,具有广阔的应用前景。

## 参 考 文 献

- 1 T. W. Hänsch, I. S. Shahin, A. L. Schawlow. High-resolution saturation spectroscopy of the sodium D lines with a pulsed tunable dye laser [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1971, **27** (11): 707~710
- 2 Hu Yuanhui, Fu Jishi. Study on the abnormal signal in the saturation absorption spectroscopy of sodium atoms[J]. *Chinese Phys. Lett.*, 1985, **2**(10): 434~436
- 3 Takashi Fujii, Tetsuo Fukuchi. Laser Remote Sensing[M]. Boca Raton: CRC Press, 2005. 215~216
- 4 C. Y. She, J. R. Yu. Doppler-free saturation fluorescence spectroscopy of Na atoms for atmospheric application[J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(6): 1063~1075
- 5 C. Y. She, J. R. Yu, H. Latifi *et al.*. High-spectral-resolution fluorescence light detection and ranging for mesospheric sodium temperature measurements [J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31** (12): 2095~2106
- 6 Zen Jinyan. Quantum Mechanics[M]. Beijing: Science Press, 2007. 299~300
- 曾谨言. 量子力学[M]. 北京: 科学出版社, 2007. 299~300
- 7 Wolfgang Demtröder. Laser Spectroscopy (Vol. 1: Basic Principles)[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2008. 92~95
- 8 Wolfgang Demtröder. Laser Spectroscopy (Vol. 2: Experimental Techniques)[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2008. 93
- 9 Lu Tongxing, Lu Yiqun. Laser Spectrum Technique Principle and Application[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2006. 232~248
- 陆同兴, 路铁群. 激光光谱技术原理及应用[M]. 合肥: 中国科

- 学技术大学出版社, 2006. 232~248
- 10 K. Shimoda. High-Resolution Laser Spectroscopy[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1976. 96~171
- 11 Xu Li, Hu Xiong, Yan Zhaoai *et al.*. Retrieval method of atmospheric parameters for a sodium doppler lidar[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, **38**(1): 140~143  
徐 丽, 胡 雄, 闫召爱等. 钠多普勒激光雷达大气参数反演方法[J]. *红外与激光工程*, 2009, **38**(1): 140~143
- 12 Sun Xutao, Liu Jiqiao, Zhou Jun *et al.*. Confocal fabry-perot interferometer for frequency stabilization of laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(7): 1005~1008  
孙旭涛, 刘继桥, 周 军等. 激光稳频的共焦法布里-珀罗干涉仪[J]. *中国激光*, 2008, **35**(7): 1005~1008
- 13 Song Zengyun, Wang Lijun, Bao Chengyu. Effect of laser power density on lasing lifetime of low concentration rhodamine 6G[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(12): 1992~1996  
宋增云, 王立军, 包成玉. 激光功率密度对低浓度若丹明 6G 染料激光寿命的影响[J]. *中国激光*, 2008, **35**(12): 1992~1996
- 14 Chen Feng, Li Shuang, Wang Ji *et al.*. Linearity measurement of accurate photodetector[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 889~893  
陈 风, 李 双, 王 骥等. 高精度光电探测器的线性测量[J]. *光学学报*, 2008, **28**(5): 889~893
- 15 R. W. P. Drever, J. L. Hall, F. V. Kowalski *et al.*. Laser phase and frequency stabilization using an optical resonator[J]. *Appl. Phys. B*, 1983, **31**(2): 97~105