

# 连续单频激光的腔外调频及其在光谱测量中的应用

周志尧 景春阳 张峭峰 朱利洲 林福成

(中国科学院上海光机所, 上海 201800)

**提要** 研制了一台通光孔径为 2 mm 的 LiTaO<sub>3</sub> 射频电光调制器, 调制频率为 95 MHz。获得十个边频分量, 并对调频结果作了分析。应用此器件所产生的调频激光束测得 <sup>238</sup>U 和 La 的荧光谱, 对比和分析了单频激光和调频激光荧光谱的差别, 获得了明显的谱线增宽及增强效应。

**关键词** 电光调制器, 调频激光谱

## 1 引言

自 60 年代初出现激光后有关调频激光器的研究不论在实际应用和理论方面都不断有报道。如 1964 年 Harris 和 Targ<sup>[1]</sup> 就首先报道了 632.8 nm 氦氖调频激光器, 1965 年又由 Ammann<sup>[2]</sup> 等人作了详细的讨论。从有关的文献可以看出所研究的内容较广泛, 如激光频率的稳定、光通信、高分辨率激光光谱等<sup>[3~8]</sup>。本文仅就激光光谱发表我们的工作。根据研究需要我们研制了一射频电光调制器, 将它用于激光腔外调频, 获得了很好的调频激光束, 并用它进行了相关的激光光谱测量。

## 2 射频电光调制器

调制器采用 LiTaO<sub>3</sub> 电光晶体, 和其他晶体相比, 它具有半波电压低(约 2700 V), 工作谱区宽(450~4500 nm), 损耗角小(在 1000 MHz 时,  $\tan \delta = 0.002$ )等优点<sup>[9]</sup>。此晶体属于 3M 点群, 根据其电光矩阵参数及椭球方程作简单运算后可得<sup>[10]</sup>

$$Ax^2 + Ay^2 + Bz^2 = 0 \quad (1)$$

其中  $A = n_1^{-2} + \gamma_{13}E_z = n_0^{-2}$ ,  $B = n_3^{-2} + \gamma_{33}E_z = n_c^{-2}$ , 设激光在  $xoy$  平面内传播, 其电场分量为  $e = e_0 \cos(\omega t + \psi_0)$ , 偏振方向为  $z$  方向。在  $z$  方向加电场  $E_z$ , 在传播距离  $l$  后产生附加相位移, 此时有

$$e = e_0 \cos\left[\omega t + \psi_0 + n_c \frac{2\pi l}{\lambda}\right] = e_0 \cos\left[\omega t + \psi_0 + n_3 \frac{2\pi l}{\lambda} - n_3^3 \gamma_{33} \frac{\pi l}{\lambda} E_z\right] = e_0 \cos(\omega t + \psi + \theta) \quad (2)$$

其中  $\varphi = \psi_0 + n_3(2\pi l/\lambda)$ ,  $\theta = -n_3^3 \gamma_{33}(\pi l/\lambda) E_z$ , 和外加电场  $E_z$  有关的相位移为

$$\theta = -\pi \frac{1}{2} \gamma_{33} (\pi l / \lambda) E_z \quad (3)$$

将 LiTaO<sub>3</sub> 的参数及有关的实验条件:  $\lambda = 591.5 \text{ nm}$ ,  $l = 4 \text{ cm}$ ,  $E_z = 100 \text{ V}/0.2 \text{ cm}$  代入, 得  $\theta = 3.3$ 。

(2) 式表示在  $z$  轴方向加上恒定电场  $E_z$  时, 激光所产生的相位移。当运用射频电压调制, 则产生调频激光, 设射频频率为  $\Omega_m$ , 则(2)式可写成

$$e = e_0 \cos[\omega t + \psi + \theta_0 \sin \Omega_m t] \quad (4)$$

其中  $\theta_0$  称相位调制系数, 有  $\theta_0 = \Delta\omega / \Omega_m$ 。(4) 式可以用第一类  $n$  阶贝塞尔函数  $J_n$  展开<sup>[11]</sup>

$$e = e_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(\theta_0) \sin(\omega + n\Omega_m)t \quad (5)$$

从(5)式可看出, 在调频激光束中, 在激光频率  $\omega$  的两侧出现对称的边频  $\omega + n\Omega_m$ , 其相应的振幅与贝塞尔函数  $J_n(\theta_0)$  有关, 有

$$J_n(\theta_0) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k (\theta_0/2)^{n+2k}}{k!(n+k)!} \quad (6)$$

对于不同  $\theta_0$  所相应的  $J_n$  值可由特种表查得。对于此器件, 在前述实验条件下我们作了测量, 图 1 是由扫描干涉仪测得的连续单频激光器输出激光调频后的频谱图, 调制频率为 95 MHz。从图 1 中可看出在激光频率两侧各有五个边频, 其相应振幅列于表 1, 在表 1 中同时列出了理论值, 实验值和理论值基本相符,  $J_2, J_4, J_5$  偏差较大的原因是由于调制器与射频信号发生器阻抗匹配不良使正弦波波形失真较大所引起的。所得结果可求得最大相位移  $\Delta\omega = \theta_0 \Omega_m = 320 \text{ MHz}$ 。

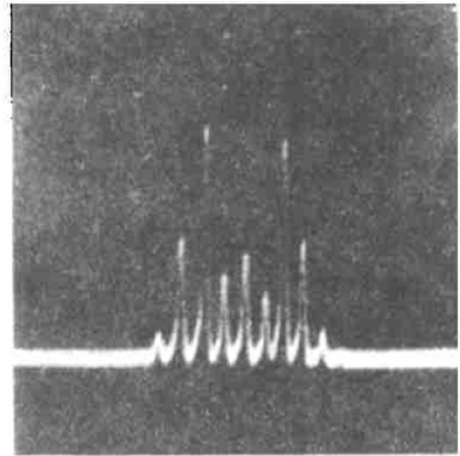


Fig. 1 Frequency modulated laser spectrum produced by LiTaO<sub>3</sub> moderator, wavelength of dye laser is 591.5 nm

Table 1 Amplitudes of sideband component of laser modulated frequency

Sideband component		Centre	First	Second	Third	Fourth	Fifth
Amplitude	Experiment	1	0.67	2.0	1.1	0.25	0.09
	Calculation	1	0.67	1.4	1.1	0.52	0.19

### 3 光谱测量结果

将调频激光用于光谱的研究在实验和理论上都有报道<sup>[4,8]</sup>, 我们工作的内容为运用未调频和调频连续染料激光在空心阴极灯中测定某些原子的消多普勒荧光谱并比较它们的结果。

实验所用装置框图如图 2 所示。由空心阴极灯产生原子蒸气。激发原子的激光由 4 W 氩离子激光器泵浦的环形连续染料激光器产生。染料激光经电光调制器调频。射频电压由射频信号发生器产生, 其频率为 95 MHz。调制器两电极上谐振的射频振幅峰—峰值为 100 V。调频激光的频谱由扫描干涉仪及示波器监测。荧光信号经透镜聚焦后到单色仪, 再经示波器或锁相放大器放大记录。为在空心阴极灯中获得较窄的荧光谱线, 我们采用了内调制技术<sup>[12]</sup>以消除

多普勒增宽。

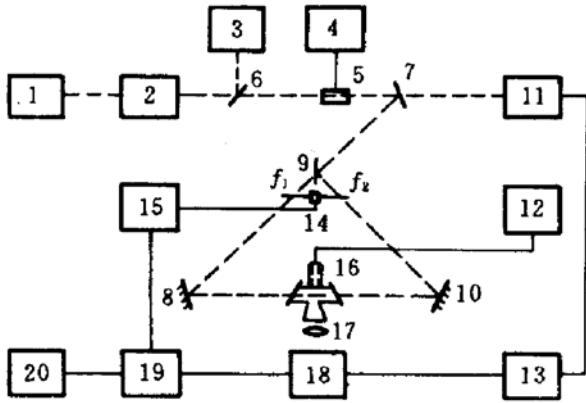


Fig. 2 Schematic diagram for measurement

1—Ar<sup>+</sup> laser; 2—Ring dye laser; 3—Wavelength meter; 4—RF-generator; 5—Electro-optical modulator; 6, 7, 8, 9, 10—Mirror; 11—Scanning etalon; 12—HCD power supply; 13—Oscilloscope; 14—Chopper; 15—Chopper power supply; 16—Hollow-cathode discharge (HCD); 17—Len; 18—Monochromator; 19—Lock-in amplifier; 20—Recorder

图 3 给出了 <sup>238</sup>U 的共振荧光谱线, 泵浦激光和荧光波长为 591.5 nm, 相应的跃迁为  $0\text{ cm}^{-1} (5f^36d7s^25L_0^0) \rightarrow 16900.387\text{ cm}^{-1} (f^3dsp)$ , 其中 (a) 为运用未调频激光测得。(b) 为在其他条件完全相同情况下, 运用调频激光测得的结果。比较 (a), (b) 两曲线可明显看出当采用调频激光时所得消多普勒曲线要比采用未调频激光所得的曲线宽。以实验所用调频谱参数按  $I = \sum_{n=0}^{\infty} \alpha_n g_n(\omega)$  (其中  $\alpha_n$  为频谱振幅系数,  $g_n(\omega)$  为线型函数) 作简单的线型计算, 求得曲线半高宽为 450 MHz 和实验值 460 MHz 相符。但线型侧翼不能完全重合。在文献[8]中用速率方程对不同调制波作了理论探讨。但该文是以三能级系统为基础。和本工作的二能级原子系统及在空心阴极灯中原子间存在剧烈碰撞等条件相距很远, 因此很难作比较。对 <sup>238</sup>U 在其他条件相同情况下, 将运用调频激光和未调频激光两者所得信号相比, 采取多次平均方法, 求得信号线宽增大 2.3 倍, 曲线下面积增大 1.4 倍, 因而有明显的信号增强效应。其原理为当采用调频激光时, 由于激光中包含多个频谱分量, 它们同时和不同速度的原子相互作用, 因而增加了相互作用的总原子数。

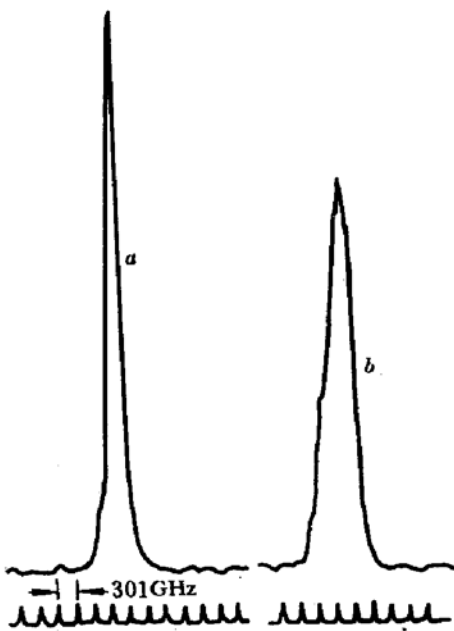


Fig. 3 Fluorescence shape of Uranium,  
 $\lambda_p = \lambda_f = 591.5\text{ nm}$   
(a) Single-frequency laser; (b) Modulated laser,  $\Omega_m = 95\text{ MHz}$

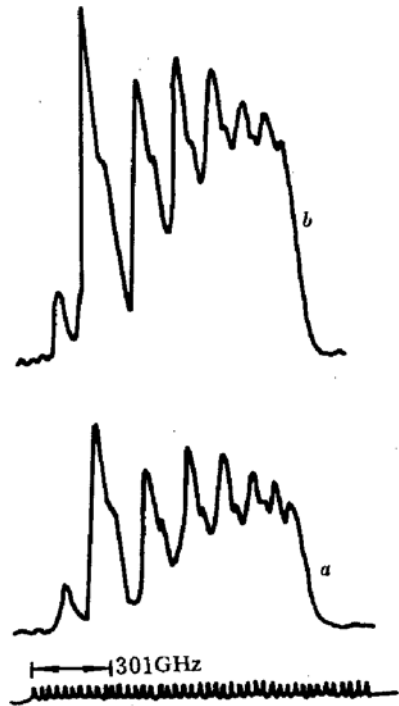


Fig. 4 Super-fine structure spectrum of lanthanum  
 $\lambda_p = 579.083\text{ nm}, \lambda_f = 600.8\text{ nm}$   
(a) Single-frequency laser; (b) Modulated laser,  $\Omega_m = 95\text{ MHz}$

图 4 是 La 原子的一超精细结构谱, 泵浦激光波长为 579.1 nm, 相应的跃迁是  $3494.526 \text{ cm}^{-1} (5d^26s, 4f_{7/2}) \rightarrow 20763.2 \text{ cm}^{-1} (5d^26p, 4f_{7/2}^0)$ , 荧光波长为 600.8 nm。由比较 (a), (b) 两曲线可明显看出, 当运用调频激光泵浦 La 原子时, 在保持相同分辨率情况下, 所得信号比采用未调频激光所得信号强。

从以上结果可以看出, 采用调频激光, 在许多场合可以提高激光光谱的检测灵敏度。

### 参 考 文 献

- 1 S. E. Harris, R. Targ. *Appl. Phys. Lett.*, 1964, **5**: 202
- 2 E. O. Armmann, B. J. McMurtry, M. K. Oshman. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1965, QE-1: 263
- 3 D. M. Kane, S. R. Bramwell, A. I. Ferguson. *Appl. Phys. (B)*, 1986, **39**: 171~178
- 4 S. R. Bramwell, A. I. Ferguson, D. M. Kane. *Opt. Lett.*, 1985, **12**(9): 666~668
- 5 代 伐, 冯志超. *中国激光*, 1989, **16**(3): 167~168
- 6 H. Dammann. *SPIE*, 1990, **1274**: 253
- 7 G. B. Picotto, V. Wataghin. *J. Phys. (B): At. Mol. Opt. Phys.*, 1992, **25**: 2489~2500
- 8 P. Tremblay, J. Beaubien, A. Miclaud *et al.*. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1992, **9**(9): 1537~1542
- 9 W. G. Drisooll. *Handbook of Optics*, McGraw-Hill book company, 1978, 17~3
- 10 F. T. Arecchi, E. O. Schulz-dubois. *Laser Handbook*, 1972. Vol. 1: 975
- 11 S. M. Selby *et al.*. *Handbook of Mathematical Tables*, Chemical Rubber Publishing Company, 1962. 368
- 12 W. Demtroder. *Laser Spectroscopy*, New York: Spring-Verlag Berlin Heidelberg, 1981. 525

## Extracavity Modulation of a Single-frequency dye laser and Its Application in Spectral Measurement

Zhou Zhiyao Jing Chunyang Zhang Shaofeng Zhu Lizhou Lin Fucheng

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

**Abstract** A LiTaO<sub>3</sub> electro-optics modulator used to modutate single-frequency dye laser was reported. The modulated frequency is 95 MHz. Ten sidebands have been obtained. Using this device to measure the fluorescene of <sup>238</sup>U and superfine structure of La, a good result was achieved.

**Key words** electro-optics modulator, laser spectroscopy of modulated frequency laser