

# 一种测量激光跃迁截面和荧光寿命的新方法

连天泉 沈鸿元

(中国科学院福建物构所, 福州)

**摘要:** 本文介绍了利用激光弛豫振荡频率和激光参数的关系来测量激光跃迁截面和荧光寿命的方法。利用该方法测量了 Nd:YAG  $1.0642\mu\text{m}$  和 Nd:YAP  $1.0795\mu\text{m}$  的激光跃迁截面及荧光寿命, 其结果分别为  $43 \times 10^{-20} \text{cm}^2$ ,  $253\mu\text{s}$  和  $46 \times 10^{-20} \text{cm}^2$ ,  $142\mu\text{s}$ 。

**关键词:** 激发跃迁截面, 荧光寿命, 新测量方法

## A new method for measurement of laser transition cross section and fluorescence lifetime

Lian Tianquan, Shen Hongyuan

(Fujian Institute of Matter Structures, Academia Sinica, Fuzhou)

**Abstract:** A new method for measurement of the laser transition cross-section and fluorescence lifetime is introduced. It is based on the relation between the laser relaxation oscillation frequency and the laser parameters. By this method, the transition cross-section and the fluorescence lifetime of Nd:YAG laser at  $1.0642\mu\text{m}$  and Nd:YAP laser at  $1.0795\mu\text{m}$  are measured to be  $43 \times 10^{-20} \text{cm}^2$ ,  $252\mu\text{s}$  and  $46 \times 10^{-20} \text{cm}^2$ ,  $142\mu\text{s}$  respectively.

**Key words:** stimulated transition cross-section, fluorescence lifetime, new method of measurement.

### 一、引言

跃迁截面和荧光寿命是衡量激光材料优劣的一项重要指标,也是器件设计中必不可少的一个重要参数。以往主要采用光谱学方法<sup>[1]</sup>测量激光跃迁截面和用荧光衰减法测量荧光寿命。文献[2]报道的测量激光跃迁截面的方法精度也不高,只宜测相对量。

本文我们介绍了利用激光弛豫振荡频率和激光参数的关系来同时测量激光跃迁截面和上能级荧光寿命的方法。对于那些已获得激光输出的谱线,该方法具有简单、精确、不受波段限制等优点。

## 二、原 理

对于一个均匀加宽的四能级固体激光器,可得到如下的单模速率方程<sup>[3,4]</sup>:

$$\frac{dn}{dt} = R - n/\tau - n/\tau_s \quad (1)$$

$$\frac{dq}{dt} = n/\tau_s - q/\tau_q \quad (2)$$

其中  $n$ ——反转粒子数密度;  $q$ ——光子数密度;  $\tau$ ——激光上能级荧光寿命;  $\tau_s$ ——受激跃迁寿命,定义为  $\tau_s = I_s/I \cdot \tau$ ;  $I_s$ ——饱和光强,  $I_s = h\nu/\sigma\tau$ ;  $R$ ——泵浦速率;  $\tau_q$ ——腔内光子寿命,对于固体激光器有

$$\tau_q = \frac{d + (n-1)l}{\left(\frac{T}{2} + r_i\right) \times C},$$

其中  $d$  为腔长,  $l$ 、 $n$  分别为激光棒长及折射率,  $T$  为镜子透射损耗,  $r_i$  是腔内除了透射损耗外的其它单程损耗。

设激光在其稳态 ( $n_0, q_0$ ) 附近受到小微扰。令  $n = n_0 + m$ , ( $m \ll n_0$ );  $q = q_0 + r$ , ( $r \ll q_0$ ), 在小信号近似下,把上式代入速率方程(1)、(2),忽略  $m, r$  的二次以上的高次项,可得

$$\frac{d^2r}{dt^2} + \left(\frac{1}{\tau} + \frac{1}{\tau_s}\right) \frac{dr}{dt} + \frac{1}{\tau_q\tau_s} r = 0 \quad (3)$$

其解为

$$r = r_0 \exp(-\alpha t) \exp[i\omega_0(\omega_0^2 - \alpha^2)^{1/2} t]$$

其中,

$$\left\{ \begin{aligned} \omega_0^2 &= \left(\frac{1}{\tau_q} \cdot \frac{1}{\tau_s}\right) \end{aligned} \right. \quad (4)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \alpha &= \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\tau} + \frac{1}{\tau_s}\right) \end{aligned} \right. \quad (5)$$

$\omega_0$ ——弛豫振荡固有圆频率;  $\alpha$ ——阻尼系数。

若激光输出功率为  $P_{out}$ , 输出镜透过率为  $T_2$ , 激光棒上的光斑大小为  $\pi r^2$ , 则腔内平均光强为

$$I = \frac{2P_{out}/T_2}{\pi r^2}$$

再利用  $\tau_s$  和  $I_s$  的定义,可得

$$\sigma = \frac{h\nu T_2 \pi r^2}{2\tau_s P_{out}} \quad (6)$$

其中

$$\left\{ \begin{aligned} \tau_s &= (\omega_0^2 \cdot \tau_q)^{-1} \end{aligned} \right. \quad (7)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \tau_q &= \frac{d + (n-1)l}{\left(\frac{T}{2} + r_i\right) C} \end{aligned} \right. \quad (8)$$

分别在阈值条件和稳态条件下求解速率方程(1)、(2),得

$$\tau = (x-1)\tau_s \quad (9)$$

其中  $x = R_0/R_{th}$ , 为稳态泵浦功率和阈值泵浦功率之比。

所以只要在实验中测得弛豫振荡频率、激光输出功率、激光光斑大小、腔内单程损耗以及

泵浦功率和阈值泵浦功率,就可以通过(6)~(9)式计算出跃迁截面和上能级荧光寿命。

虽然以上各式是通过单模速率方程得到的,但实际对于不同的纵模,各量的差别很小,而对不同的横模各量的差别较大。因此我们在实验中可以忽略纵模的影响,用  $TEM_{00}$  模激光输出进行测量,使实验简便又能保证精确度。

### 三、测量方法

按照以上原理,我们采用如下实验装置来进行测量。

在 Nd:YAG 或 Nd:YAP CW 激光腔(1)中插入可变孔径光阑对激光选取  $TEM_{00}$  模输出,根据光束扫描法<sup>[5]</sup>,通过转镜 3、狭缝 4、锗光敏二极管 5 及示波器 7,将模式的空间分布转变为示波器上的时间分布来判定其模式。分光镜 2 分出一路光经锗光敏二极管 6 接收并在示波器上观察其弛豫振荡波形,并测量其频率。由于固体激光器的弛豫振荡阻尼系数较小,使得固体激光对外界微小的扰动较敏感,容易激起弛豫振荡。

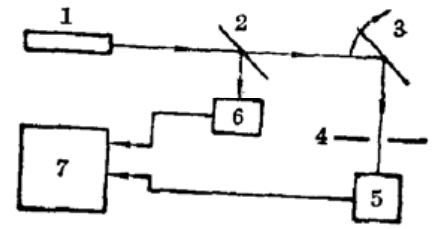


图 1 测量装置

根据高斯光束的空间分布,可以计算出光阑半径和该点光束  $1/e^2$  中心光强处离光轴距离  $w$  的关系为  $r=2w$ 。用读数显微镜测量光阑孔径,并根据高斯光束传播原理计算激光棒上的光束大小。采用阈值法<sup>[6]</sup>测量腔内除腔镜透射损耗外的其它单程损耗,包括棒的吸收、散射和衍射损耗等。并用 JGZ-1 型功率计测量激光功率。

### 四、实验结果

利用上述方法,我们测量了 [111] 取向 Nd:YAG  $1.0642 \mu\text{m}$  和 [010] 取向 Nd:YAP [001] 偏振  $1.0795 \mu\text{m}$  的激光跃迁截面和荧光寿命。其结果列于表 1、2 中。

表 1 Nd:YAG  $1.0642 \mu\text{m}$  跃迁截面和荧光寿命的测量

波 长 $\lambda$	1.0642 $\mu\text{m}$		
腔型及参数	平行平面腔棒轴取向 [111] $n=1.818$ , $L=11.30 \text{ cm}$ $D=40.50 \text{ cm}$ , $z_1=4.50 \text{ cm}$ , $z_2=17.00 \text{ cm}$ $T_1=0.50\%$ , $T_2=2.75\%$ , $r_i=0.095$		
腔内光子寿命 $\tau_Q$	$\tau_Q=1.490 \times 10^{-8} \text{ s}$		
阈值泵浦功率 $P_0(\text{W})$	1387.0		
泵浦功率 $P(\text{W})$	2346.0	2593.5	2833.6
激光输出功率 $P_{out}(\text{W})$	0.36	0.40	0.44
棒上光斑半径 $r_2(\text{cm})$	0.0827	0.0792	0.0752
弛豫振荡频率 $f(\text{kHz})$	68.40	75.98	84.39
受激发射寿命 $\tau_s(\mu\text{s})$	363.4	294.5	238.7
上能级荧光寿命 $\tau(\mu\text{s})$	251	256	250
跃迁截面 $\sigma(10^{-20}\text{cm}^2)$	43	43	43

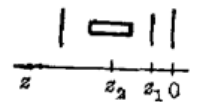


表 2 Nd:YAP 1.0795  $\mu\text{m}$  跃迁截面和荧光寿命的测量

波 长 $\lambda$	1.0795 $\mu\text{m}$		
腔 型 及 参 数	平行平面腔 [010]轴棒, $n=1.9085^{[7]}$ , $L=10.1\text{ cm}$ $d=40.50\text{ cm}$ , $s_1=4.50\text{ cm}$ , $s_2=17.00\text{ cm}$ $T_1=0.40\%$ , $T_2=3.07\%$ , $r_1=0.039$		
腔内光子寿命 $\tau_Q$	$\tau_Q=2.938 \times 10^{-8}(\text{s})$		
阈值泵浦功率 $P_0(\text{W})$	1204.5		
泵浦功率 $P(\text{W})$	1888.0	2117.5	2349.6
激光输出功率 $P_{out}(\text{W})$	0.45	0.60	0.72
棒上光斑半径 $r_2(\text{cm})$	0.0809	0.0755	0.0713
弛豫振荡频率 $f(\text{kHz})$	57.23	67.43	78.77
受激发射寿命 $\tau_s(\mu\text{s})$	263.3	189.6	139.0
上能级荧光寿命 $\tau(\mu\text{s})$	149	144	132
跃迁截面 $\sigma(10^{-20}\text{cm}^2)$	49	45	45

## 五、讨 论

对于 Nd:YAG 1.0642  $\mu\text{m}$  激光的跃迁截面和荧光寿命已经有许多报道<sup>[1,2]</sup>。其结果在  $2.7 \sim 8.8 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$  之间。目前国际上采用的结果为 S. Singh 等人<sup>[1]</sup>的测量结果: 跃迁截面  $4.6 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ , 上能级荧光寿命 230  $\mu\text{s}$ 。与本文的结果在测量误差范围内是一致的。

对于 Nd:YAP 1.0795  $\mu\text{m}$  激光跃迁截面和荧光寿命的测量报道不多。目前人们都采用 M. J. Weber 等人<sup>[8,9]</sup>的结果: 跃迁截面  $4.4 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ , 上能级荧光寿命 150  $\mu\text{s}$ 。和我们的结果在实验误差范围内也是一致的。所以, 利用激光弛豫振荡频率和激光参数的关系来测量激光的跃迁截面和荧光寿命是一种可行的方法, 不但简单, 还具有以下优点:

1. 精确度高。最大百分比误差为 7%, 而文献中报道的测量方法误差均大于 20%。
2. 不受跃迁波长的限制。用这种方法我们已测量了无法用光谱学方法测量的 Nd<sup>3+</sup>  $4F_{3/2} - 4I_{13/2}$  激光跃迁截面, 其结果另文发表。

本方法只能用于测量那些已经获得激光输出的谱线。其主要误差来源于: i) TEM<sub>00</sub> 模选取不准确。基模的选择对本实验的精确度影响较大。在腔内插入孔径光阑选模时, 一定要注意调节光阑和光轴同心。ii) 热效应的影响。由于固体激光器存在着热透镜效应, 当泵浦功率增大时, 热透镜的影响使得腔内损耗增大。因此应尽量在低泵浦功率下测量。

## 参 考 文 献

- 1 S. Singh *et al.*, *Phys. Rev.*, **10**(9), 2566(1974)
- 2 M. Birnbaum *et al.*, *J. Appl. Phys.*, **43**, 2335(1972)
- 3 H. G. Danielmeyer, *Laser: A Series of Advances*, **4**, 38.
- 4 H. G. Danielmeyer, *J. Appl. Phys.*, **41**(10), 4014(1970)
- 5 福建物质结构研究所 201 组, *激光*, **2**(3), 33(1975)
- 6 D. Findlay *et al.*, *Phys. Lett.*, **20**(3), 277(1966)
- 7 徐浩 *et al.*, *硅酸盐学报*, **15**(3), 271(1987)
- 8 M. J. Weber *et al.*, *J. Appl. Phys.*, **42**(13), 4996(1971)
- 9 M. J. Weber *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **15**(10), 342(1969)