

# 无腔内扩束器和标准具的窄谱线 脉冲染料激光器

张培林 赵朔嫣

(清华大学)

**提要:** 利用仅由两个光栅和一个共振反射器组成的激光腔, 就能得到线宽为 1.3 千兆赫的由  $N_2$  激光泵浦的染料激光。介绍了一种根据光强与波长关系来计算线宽的公式, 计算结果与实验结果相符。

## Spectrally narrow pulsed dye laser without intracavity beam expander and etalon

Zhang Peilin Zhao Shuoyan

(Qinghua University)

**Abstract:** By using a laser cavity which consists of only two gratings and a resonant reflector, a  $N_2$ -laser-pumped dye laser with a spectral linewidth of 1.3 GHz has been made. A formula of linewidth calculation based on relation of light intensity versus wavelength is presented and the calculated values are found to agree with experimental results.

### 一、引言

脉冲调谐染料激光器是开展激光光谱学研究的重要手段之一。为要精细地研究原子、分子的谱线并能有效地进行选择性的激发, 需要染料激光器有窄的线宽。氮分子激光泵浦的染料激光器最早是 Hänsch<sup>[1]</sup> 提出在腔内加扩束望远镜和法布里-珀罗标准具来压缩线宽。之后 Hanna<sup>[2]</sup>、Wyatt<sup>[3]</sup> 等使用单棱镜作为腔内扩束器。最近 Shoshan<sup>[4, 5]</sup>、Littman<sup>[6]</sup> 等提出省去腔内扩束装置, 只用光栅掠角入射以增加光束照射光栅的栅纹数目, 同样可以达到压缩线宽的目的。Sho-

shan<sup>[5]</sup> 使用两块光栅对氮分子激光泵浦的染料激光器获得 3 千兆赫的线宽。Littman<sup>[6]</sup> 使用一块光栅和一块全反射镜对 Nd:YAG 倍频激光泵浦的染料激光器获得 2.5 千兆赫的线宽。

本文使用类似于 [5] 的方法, 但使用共振反射器<sup>[7]</sup> 代替平面输出镜, 实验装置如图 1 所示。 $G_1$  为掠角入射光栅,  $G_2$  为调谐波光栅 (Littrow 装置),  $C$  为染料盒, 用氮分子 0.337 微米激光泵浦,  $R$  为共振反射器, 通过  $R$  透射出去的激光即为输出激光。此方法的优点为: 1) 结构简单, 连染料盒在内腔只包括四个元件; 2) 省去扩束望远镜后, 腔长缩

收稿日期: 1979 年 11 月 23 日。

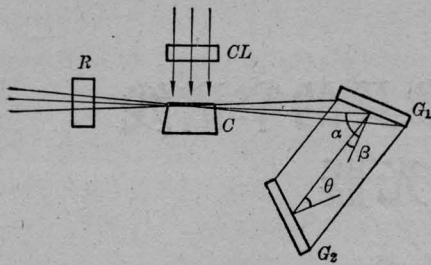


图1 实验装置图

C—染料盒; CL—柱面透镜;  $G_1$ 、 $G_2$ —光栅;  
R—共振反射器

短从而使短脉冲泵浦光得到更有效的利用;而且减少了腔内反射面的数目,不易引起腔内寄生激光振荡;3)使用共振反射器比使用平面镜输出可获得更窄的线宽。共振反射器不同于腔内标准具,它是代替输出平面镜的作用,不引起附加损耗;激光沿共振反射镜法线入射,调整方便。

## 二、元件的选频能力及线宽计算公式

染料激光器的线宽决定于光栅、共振反射器的选频能力以及激光光束的发散角。除了改进氮分子激光和染料激光的光束质量以减少发散角以外,采用掠角入射光栅就兼具增大光栅照射条纹数目(从而提高其选频能力)和压缩光束发散角两种功能。

设中心光线的入射角为  $\alpha_0$ , 光束的半发散角为  $\delta\alpha_0$ ; 自光栅出射的中心光线衍射角为  $\beta_0$ , 光束的半发散角为  $\delta\beta_0$ ; 则掠角入射光栅可将光束发散角压缩  $M$  倍,

$$M = \left| \frac{\delta\alpha_0}{\delta\beta_0} \right| = \frac{\cos \beta_0}{\cos \alpha_0} \quad (1)$$

为了减少光栅的损失,应使光栅只出现一级衍射光,这相当于要求光栅栅距  $a_1$  满足下述关系:

$$\frac{\lambda_0}{2} < a_1 < \lambda_0 \quad (2)$$

为要能同时保持  $M$  较大,  $a_1$  应选择近于  $\lambda_0$ 。

因此,如果要求波长调谐范围复盖整个可见光区,则应选取  $a_1 \approx 0.4$  微米,实际可使用 2400 线/毫米的光栅。如果只要求在长波一端调谐,则亦可选用 1800 线/毫米的光栅。对于 1800 线/毫米光栅,激光波长  $\lambda_0 = 0.6$  微米,当入射角  $\alpha_0 = 89^\circ$  时,  $M = 57$ ;  $\alpha_0 = 89.5^\circ$  时,  $M = 114$ 。可见掠角入射光栅可代替扩束镜起压缩光束发散角的作用。

光栅的实际使用的条纹数  $N$  (即被光束照射到的条纹数)越多,光栅的选频性能越好。设染料盒中心到光栅  $G_1$  中心的距离为  $l$ , 则  $G_1$  的照射条纹数  $N_1$  满足下述关系:

$$2l\delta\alpha_0 = N_1 a_1 \cos \alpha_0 \quad (3)$$

光栅  $G_2$  为 Littrow 用法,中心光线入射角和衍射角均为  $\theta_0$ 。从光线的几何关系容易得出  $G_2$  的照射条纹数  $N_2$  与  $N_1$  有下列关系:

$$N_1 a_1 \cos \beta_0 = N_2 a_2 \cos \theta_0 \quad (4)$$

式中  $a_2$  为  $G_2$  的栅距。由此可见光栅  $G_2$  的长度应比光栅  $G_1$  更长些。

引入光栅的归一化选频因子:

$$\Phi_G = \frac{\sin^2 N \left[ \frac{\pi a}{\lambda} (\sin \alpha + \sin \beta) \right]}{N^2 \left[ \frac{\pi a}{\lambda} (\sin \alpha + \sin \beta) \right]^2} \quad (5)$$

当光线以  $\alpha_0 + \delta\alpha$  角向  $G_1$  入射,经过  $G_1 G_2 G_1$  的作用而以  $\alpha_0$  角射回到染料盒时,总的选频因子可证明为:

$$\Phi_{G_1} \Phi_{G_2} \Phi_{G_1} = \frac{\sin^6 \left\{ \frac{\pi}{3} (2N_1 + N_2) \cdot \left[ \frac{a_1 \cos \alpha_0 \delta\alpha}{\lambda_0 (2 + a_1 \cos \beta_0 / a_2 \cos \theta_0)} - \frac{\delta\lambda}{\lambda_0} \right] \right\}}{\left\{ \frac{\pi}{3} (2N_1 + N_2) \cdot \left[ \frac{a_1 \cos \alpha_0 \delta\alpha}{\lambda_0 (2 + a_1 \cos \beta_0 / a_2 \cos \theta_0)} - \frac{\delta\lambda}{\lambda_0} \right] \right\}^6} \quad (6)$$

为了进一步增加腔的选频性能,使用共振反射器代替平面镜输出。共振反射器的选频因子为<sup>[8]</sup>:

$$\Phi_R = \frac{(1+r)^2 \sin^2\left(\frac{2\pi}{\lambda} n_R l_R\right)}{(1-r)^2 + 4r \sin^2\left(\frac{2\pi}{\lambda} n_R l_R\right)} \quad (7)$$

式中  $r$  是共振反射器的每个表面的光强反射率,  $n_R l_R$  为共振反射器的光学长度。适当选择此光学长度, 它也能对压缩线宽做出一定贡献。

再考虑到光线随  $\delta\alpha$  角不同有一定的分布几率, 则腔的选频线形函数为:

$$\begin{aligned} & \Phi\left(\frac{\delta\lambda}{\lambda}\right) \\ &= C \int_{-\pi}^{\pi} \frac{\sin^2 \zeta}{\zeta^2} \\ & \cdot \frac{\sin^6 \left\{ \frac{\pi}{3} (2N_1 + N_2) \cdot \left[ \frac{a_1 \cos \alpha_0 \delta\alpha_0}{\lambda_0 (2 + a_1 \cos \beta_0 / a_2 \cos \theta_0)} \frac{\zeta}{\pi} - \frac{\delta\lambda}{\lambda_0} \right] \right\}}{\left\{ \frac{\pi}{3} (2N_1 + N_2) \cdot \left[ \frac{a_1 \cos \alpha_0 \delta\alpha_0}{\lambda_0 (2 + a_1 \cos \beta_0 / a_2 \cos \theta_0)} \frac{\zeta}{\pi} - \frac{\delta\lambda}{\lambda_0} \right] \right\}^6} \\ & \cdot d\zeta \frac{(1+r)^2 \cos^2\left(\frac{2\pi n_R l_R}{\lambda_0} \frac{\delta\lambda}{\lambda_0}\right)}{(1-r)^2 + 4r \cos^2\left(\frac{2\pi n_R l_R}{\lambda_0} \frac{\delta\lambda}{\lambda_0}\right)} \quad (8) \end{aligned}$$

其中

$$\zeta = \frac{\delta\alpha}{\delta\alpha_0} \pi$$

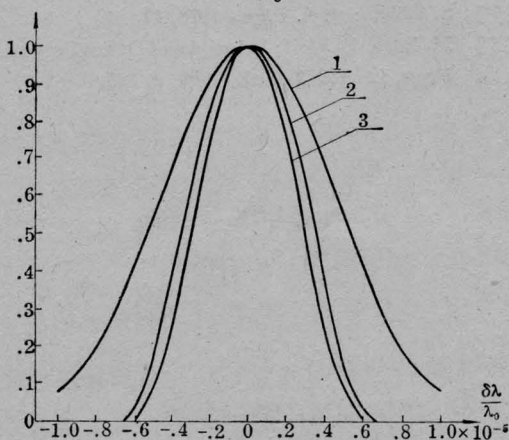


图2 选频线性函数

- 1—双光栅对线形函数的贡献  $\Phi\left(\frac{\delta\lambda}{\lambda_0}\right)/\Phi_R$ ;  
2—共振反射器的选频因子  $\Phi_R$ ;  
3—腔的选频线形函数  $\Phi\left(\frac{\delta\lambda}{\lambda_0}\right)$

$C$  为归一化常数。线形函数如图 2 所示。本文取选频线形函数的半高点全宽度为腔的单程线宽计算值。

### 三、实验结果

我们使用若丹明 6G 的乙醇溶液, 浓度为  $2 \times 10^{-3}$  克分子/升。染料盒长为 20 毫米, 两侧窗口分别有  $5^\circ$  倾角, 避免盒内产生激光寄生振荡。用焦距为 50 毫米的石英柱面透镜将氮分子激光泵浦光束聚焦在染料盒的内表面上。泵浦光束质量及其稳定性对染料激光的线宽及波长稳定性有很大影响。

谱线宽度使用法布里-珀罗标准具进行测量。一种是实心标准具, 自由光谱范围 FSR 分别为 25 千兆赫和 6.6 千兆赫; 一种是空气隙间距可调标准具, 自由光谱范围可在  $5 \sim 30$  千兆赫之间变化。标准具表面镀介质膜, 中心波长  $5800 \text{ \AA}$ , 反射率 85%, 精细系数约为 20。输出激光经过扩束后射到测量标准具, 再经过焦距为  $f = 450$  毫米的制版物镜聚焦照相。谱线全宽度  $2\delta\nu$  可按下列式计算:

$$2\delta\nu = \frac{r_p \delta r_p}{n^2 f^2} \cdot \nu \quad (9)$$

或

$$2\delta\nu = \frac{4r_p \delta r_p}{r_{p+1}^2 - r_{p-1}^2} \cdot \text{FSR} \quad (10)$$

式中  $r_p$  为第  $p$  个亮环半径,  $\delta r_p$  为第  $p$  个亮环的半宽度,  $n$  为标准具介质的折射率。

光栅  $G_1$  使用国产的复制闪耀光栅, 一种是长为 33 毫米的 1800 线/毫米光栅; 另一种是 42 毫米长的 2400 线/毫米光栅。由于后者的闪耀波长为  $2500 \text{ \AA}$ , 在  $6000 \text{ \AA}$  附近工作时效率已很低, 所以光栅  $G_2$  只使用 1800 线/毫米一种。共振反射器为未镀膜的平行平晶, 其自由光谱范围应稍大于单用两块光栅选频时的线宽。我们进行了以下三组实验: 1)  $G_1$  用 2400 线/毫米光栅,  $G_2$  用 1800 线/毫米光栅, 共振反射器  $l_R = 20$  毫米,  $n_R = 1.5$ ;

2)  $G_1$  用 2400 线/毫米光栅,  $G_2$  用全反镜代替, 共振反射器仍用 20 毫米平行平晶; 3)  $G_1$ 、 $G_2$  都用 1800 线/毫米光栅, 这时光栅选频性能较前稍差, 故使用 15 毫米平行平晶。实验条件: 激光波长  $\lambda_0 = 6000 \text{ \AA}$ ; 谐振腔长  $L \approx 180$  毫米; 掠角入射角  $\alpha_0 = 89.5^\circ$ ; 光束的半发散角  $\delta\alpha_0 = 2 \times 10^{-3}$  弧度; 氮分子激光功率保持在这样的水平, 即如在染料激光器腔内插入透射率为 70% 的衰减片时染料激光处于阈值状态。实验结果与按(8)式算出的理论值均列于表中。为了比较我们还使用透射率为 50% 的平面镜代替共振反射器输出, 相应的实验值和计算值也列于表中。

| 光栅 $G_1$<br>(线/毫米) | 光栅 $G_2$<br>(线/毫米) | 共振反射器<br>长度 $l_R$ (毫米) | 线宽实<br>验值<br>$2\delta\nu$ (千兆赫) | 线宽计<br>算值<br>$2\delta\nu$ (千兆赫) |
|--------------------|--------------------|------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 2400               | 1800               | 20                     | 1.3                             | 2.3                             |
| 2400               | 1800               | 0                      | 2.2                             | 4.2                             |
| 2400               | 全反镜                | 20                     | 1.4                             | 2.3                             |
| 2400               | 全反镜                | 0                      | 1.9                             | 4.1                             |
| 1800               | 1800               | 15                     | 1.6                             | 3.0                             |
| 1800               | 1800               | 0                      | 2.4                             | 5.3                             |

由上表可见,  $G_1$  使用 2400 线/毫米光栅比使用 1800 线/毫米光栅的线宽要窄, 使用共振反射器输出可比平面镜输出的线宽窄。

$G_1$  使用 2400 线/毫米光栅,  $G_2$  使用 1800 线/毫米光栅又配以合适厚度(20 毫米)的共振反射器时, 线宽的实验值为  $2\delta\nu = 1.3$  千兆赫, 计算值为 2.3 千兆赫。如果用全反镜代替  $G_2$ , 线宽的实验值为 1.4 千兆赫, 计算值为 2.3 千兆赫。为什么双光栅与单光栅的线宽几乎相同? 原因在于后者虽然全反镜无选频作用, 但是全反镜的长度比  $G_2$  要长, 由(4)式看出此时光栅  $G_1$  的实际使用总条纹数较多, 其选频能力因而增强。以上各点说明理论分析与实验结果是一致的。至于实验值都比计算值要小, 这是由于理论计算的是腔的单程线宽, 而实际上激光在腔内不止往返一次。考虑到这一点, 可认为理论和实验是符合的。

### 参 考 文 献

- [1] T. W. Hänsch; *Appl. Opt.*, 1972, **11**, 895.
- [2] D. C. Hanna *et al.*; *Optical and Quantum Electronics*, 1975, **7**, 115
- [3] R. Wyatt; *Opt. Commun.*, 1978, **26**, 9.
- [4] I. Shoshan *et al.*; *J. Appl. Phys.*, 1977, **48**, 4495.
- [5] I. Shoshan, U. P. Oppenheim; *Opt. Commun.*, 1978, **25**, 375.
- [6] M. G. Littman, H. J. Metcalf; *Appl. Opt.*, 1978, **17**, 2224.
- [7] S. Saikan; *Appl. Phys.*, 1978, **17**, 41.
- [8] M. Born, E. Wolf; *Principles of Optics*(Pergamon Press, London)2nd ed., 1964, p. 325.