

# 用于二聚物三能级蒸气激光系统的 环形谐振腔设计

吕志伟 王 骥 马祖光

(哈尔滨工业大学光电子技术研究所, 哈尔滨 150006)

## 提 要

针对二聚物三能级蒸气激光系统增益相对于泵浦光方向显著的不对称特性, 本文设计了一种稳定的能够充分利用介质增益特性的环形谐振腔, 给出了象散和慧差补偿及泵浦激光与谐振腔匹配的条件。文中还给出了  $\text{Na}_2B^1\Pi_u-X^1\Sigma_g^+$  跃迁激光谐振腔设计数据。

关键词: 二聚物, 三能级系统, 环形谐振腔。

## 一、引 言

二聚物蒸气型分子激光, 由于具有阈值低, 转换效率高, 光谱范围宽和易于制备等特点, 七十年代以来受到人们的普遍重视。目前获得的二聚物蒸气型分子激光, 大多是共用上能级的三能级激光系统, 如图 1 所示。这种共上能级的三能级二聚物蒸气激光介质系统, 其增益系数为<sup>[1]</sup>

$$\alpha_d = \sigma_d [n_2 - n_1 P f F_0 - n_1 P g G_0 \theta(\epsilon)] \cdot \exp[-4 \ln 2 (\Omega_d / \Delta\omega_D)], \quad (1)$$

$$\theta(\epsilon) = \begin{cases} 1, & \epsilon = 1 \text{ 与泵浦光相同方向上} \\ 0, & \epsilon = -1 \text{ 与泵浦光相反方向上} \end{cases}$$

式中  $\sigma_d$  为多普勒展宽的最大吸收或受激发射截面,  $n_1$  和  $n_2$  为能级 1 和能级 2 上总的分布粒子数密度,  $P$  为泵浦参量, 即泵浦强度与饱和泵浦强度的比值,  $\Delta\omega_D$  为多普勒线宽,  $\Omega_d$  为调谐频率,  $f$ 、 $F_0$  和  $g$ 、 $G_0$  为积分参量。当  $\alpha_d$  取负值时表示放大;  $f$  当粒子数反转时为正, 否则为负;  $g$  与粒子数反转无关, 总为正。由 (1) 式可见, 二聚物三能级蒸气介质的增益由三部分构成, 第一项是自吸收项, 第二项是粒子数反转产生的增益。尤其值得注意的是第三项, 它可以解释为喇曼放大对介质增益的贡献。由于喇曼增益的贡献, 使得介质增益相对于泵浦光方向具有显著的不对称性, 与泵浦光相同方向上介质的增益远大于与泵浦光相反方向上的增益。甚至在形成粒子数反转的情况下, 由于喇曼放大的贡献, 在与泵浦光相同方向上也可能有放大作用。

由于二聚物三能级蒸气激光系统增益的这种不对称性, 利用驻波腔, 在电磁场传播的一个往返过程中, 只有一个单程能利用这种喇曼增益。而环形谐振腔, 则是行波放大, 电磁场每次经过激光介质时都能利用上这种喇曼增益的贡献, 这将充分发挥介质的放大作用, 使放

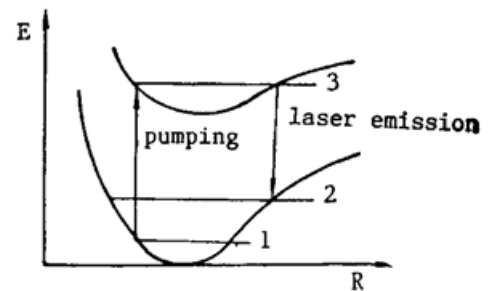


Fig. 1 Three-level laser system in dimer vapor

大过程更为有效。另一方面,也是由于增益的这种不对称性,环形腔中前向波的振荡阈值要比驻波腔中形成驻波振荡的阈值低一倍<sup>[1]</sup>。

目前环形腔在各类激光器中已有广泛应用,其主要目的是利用环形腔中电磁场的行波特点,实现激光器单频工作,获得极窄线宽<sup>[2~4]</sup>,降低损耗提高输出功率<sup>[5]</sup>,以及降低激光噪声<sup>[6]</sup>等。本文将环形谐振腔应用于二聚物三能级蒸气激光介质系统,可以充分利用其相对于泵浦光前向增益远大于后向增益的增益不对称特性,并降低激光振荡阈值,这对实现激光振荡具有极大的优越性。

## 二、环形谐振腔的象差及其补偿

在由反射镜构成的环形谐振腔中,为了实现闭合的环形光路,反射镜必然要相对于光轴倾斜放置。光学系统中相对于光轴倾斜放置的某些光学元件,对传播光束来说是不对称的,要引起象差(平面反射镜除外),本文仅考虑象差中影响较大的象差和慧差。

一束光倾斜入射到曲率半径为  $R$  的球面反射镜时,反射镜对光束的变换会引起象散,其结果使得在光束相互垂直的两个截平面内具有不同的焦距。同样,非平行光束倾斜入射到一个平面折射元件上时,平面折射元件对光束的变换也将引起象散,表现为在光束相互垂直的两个方向上有不同的有效传播距离。倾斜放置的球面反射镜和平面折射元件除了引起象散外,还将引起慧差,使得光束在光轴附近形成不对称的弥散光斑。

考虑由一个曲率半径为  $R$  的球面反射镜和一个折射率为  $n$ 、厚度为  $t$  的平面折射元件构成的组合系统,两个元件之间按图 2 所示取向。光束对球面反射镜的入射角是  $\theta$ ,对平面折射元件的入射角满足布儒斯特关系  $\tan \alpha = n$ 。光束在传播过程中经过两个引起象差的元件,如按图 2 的取向,就可以利用一个元件引起的象差和另一个元件引起的象差相互抵消的办法实现象差补偿。其象散补偿的条件为<sup>[7]</sup>

$$R \sin \theta \tan \theta = 2t(n^2 - 1) \frac{\sqrt{n^2 + 1}}{n^4} \tag{2}$$

实现慧差补偿的条件为<sup>[8]</sup>

$$R \sin \theta = 4t(n^4 - 1) \frac{\sqrt{n^2 + 1}}{n^4} \tag{3}$$

由(2)式和(3)式得

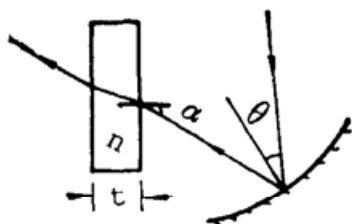


Fig. 2 Combining optical system

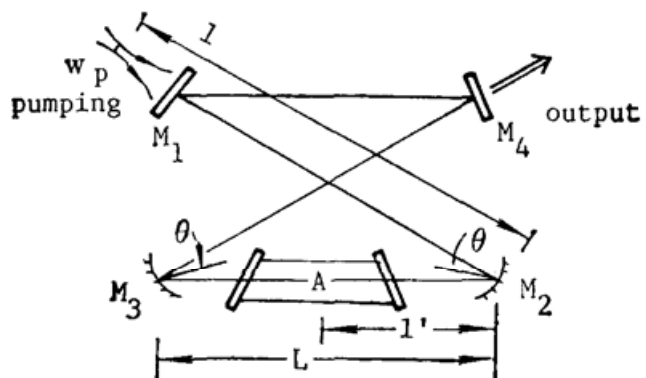


Fig. 3 Ring laser resonator within a heatpipe

$$\tan \theta = \frac{1}{2} \frac{n^3}{n^2+1}, \quad (4)$$

$$R = \frac{4(n^4-1)\sqrt{[n^6+4(n^2+1)^2](n^2+1)}}{n^{10}} t_0. \quad (5)$$

(4)式和(5)式就是对图2所示组合系统同时实现象散和慧差补偿的条件。

根据以上考虑,设计形如图3的环形谐振腔,此系统由两个球面反射镜( $M_2$ 和 $M_3$ )和两个平面反射镜( $M_1$ 和 $M_4$ )以及具有布儒斯特窗的热管炉(产生二聚物蒸气)构成,它是左右对称的。球面反射镜 $M_2$ 和 $M_3$ 与热管炉窗片构成了两个图2所示的系统,只要适当选择球面反射镜的曲率半径 $R$ ,光束入射角 $\theta$ 和热管炉窗片材料( $n$ )和厚度 $t$ ,使之满足(4)和(5)式,则可实现其象散和慧差的补偿。平面反射镜 $M_1$ 和 $M_4$ 不引起象差,它们作为输入与输出平面折射窗口时亦不产生象差,因为处于平行光路之中。因此图3所示环形谐振腔中,在热管炉内和 $M_2M_1M_4M_3$ 段是象差补偿的,没有象散和慧差存在,保证了泵浦光在热管炉中的聚焦及输出激光束的质量。因而图3所示环形谐振腔是象散和慧差补偿的。

### 三、环形谐振腔的稳定性

经过补偿后的环形谐振腔不需要考虑象差的影响,因而球面反射镜相应的焦距为 $f=(R/2)$ 。将图3的环形谐振腔展开成等效透镜序列,如图4所示,其中 $L$ 为反射镜 $M_2$ 和 $M_3$ 之间有热管炉臂的长度, $x$ 为 $M_2$ 和 $M_3$ 之间有平面反射镜臂的长度。总的光学传递矩阵为

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & x \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

由此得

$$\left. \begin{aligned} A &= 1 - \frac{x}{f} - \frac{2L}{f} + \frac{xL}{f^2}, & D &= 1 - \frac{x}{f}, \\ B &= x + L - \frac{xL}{f}, & C &= -\frac{2}{f} + \frac{x}{f^2}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

令

$$x = \xi L, \quad (8)$$

其中 $\xi$ 为一比例系数。由谐振腔的稳定判据得环形谐振腔的稳定条件为

$$2f \leq L \leq 2f \left( \frac{\xi+1}{\xi} \right), \quad (9)$$

或

$$L \leq \frac{2f}{\xi}. \quad (10)$$

由 $ABCD$ 定律<sup>[9]</sup>,环形谐振腔内高斯光束的束腰位置 $z_0$ 和大小 $w_0$ 分别为

$$z_0 = \frac{A-D}{2C}, \quad (11)$$

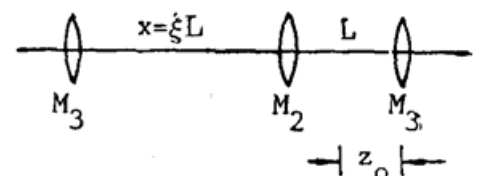


Fig. 4 Equivalent resonator with lenses replacing mirrors

$$w_0^2 = \frac{\lambda}{2\pi} \frac{\sqrt{4 - (A+D)^2}}{|O|}. \quad (12)$$

利用(7)式得图3环形腔束腰位置和大小为

$$z_0 = \frac{L}{2}, \quad (13)$$

$$w_0^2 = \frac{\lambda}{2\pi} \frac{\{[2(1+\xi)fL - \xi L^2][4f^2 - 2(1+\xi)Lf + \xi L^2]\}^{1/2}}{|2f - \xi L|}. \quad (14)$$

#### 四、泵浦高斯光束的聚焦及其与腔内高斯光束的匹配

为了在热管炉中获得高的泵浦功率密度,通常需要对泵浦激光聚焦,并使泵浦高斯光束束腰经变换后位于热管炉中心。

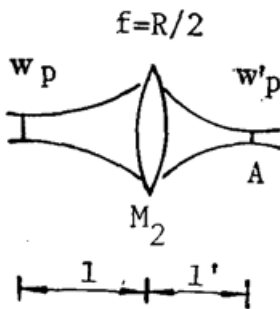


Fig. 5 Equivalent mirror  $M_2$

对图3所示的环形谐振腔,利用球面反射镜  $M_2$  对泵浦激光进行聚焦。在象差补偿情况下,反射镜  $M_2$  等效于一个焦距为  $f = (R/2)$  的透镜,如图5所示,以  $w_p$  表示泵浦激光的束腰大小,以  $w'_p$  表示聚焦在热管炉中的腰斑大小, $l$  和  $l'$  分别表示  $M_2$  到  $w_p$  和  $w'_p$  的距离,则有<sup>[10]</sup>

$$l = f + \frac{(l' - f)f^2}{(l' - f)^2 + (\pi w_p'^2/\lambda)^2}, \quad (15)$$

$$\frac{1}{w_p^2} = \frac{1}{w_p'^2} \left(1 - \frac{l'}{f}\right)^2 + \frac{1}{f^2} \left(\frac{\pi w_p'^2}{\lambda}\right)^2. \quad (16)$$

使泵浦激光聚焦到热管炉中心  $A$  处,则

$$l' = (L/2). \quad (17)$$

为了最有效地利用泵浦能量,要使泵浦高斯光束与腔内高斯光束匹配,即

$$w_p' = w_0. \quad (18)$$

式中  $w_0$  为环形谐振腔决定的高斯光束束腰大小,它由(14)式给出。利用(17)和(18)式代入到(15)和(16)式中得到

$$l = f + \frac{[(L/2) - f]f^2}{[(L/2) - f]^2 + (\pi w_0^2/\lambda)^2}, \quad (19)$$

$$\frac{1}{w_p^2} = \frac{1}{w_0^2} \left(1 - \frac{L}{2f}\right)^2 + \frac{1}{f^2} \left(\frac{\pi w_0^2}{\lambda}\right)^2. \quad (20)$$

此两式决定了对泵浦激光器输出激光腰斑大小和位置的要求,如果泵浦激光腰斑不能满足(20)式,则可通过腔外透镜变换使之满足(20)式。

#### 五、 $\text{Na}_2B^1\Pi_u - X^1\Sigma_g^+$ 激光振荡环形谐振腔设计

环形谐振腔结构如图3所示。热管炉长为5cm,布儒斯特窗片材料为熔石英。对  $\text{Na}_2B^1\Pi_u - X^1\Sigma_g^+$  跃迁其光谱范围约为500nm~550nm,在525nm波长,20°C温度下,熔石英的折射率为  $n = 1.46108$ <sup>[11]</sup>。在  $\text{Na}_2B^1\Pi_u - X^1\Sigma_g^+$  跃迁光谱区域内,折射率变化不大。按象差补偿条件(4)式和(5)式求得

$$\theta = 26.45^\circ, \quad R = 3.979t \approx 4t.$$

对  $\text{Na}_2 B^1 \Pi_u$  态, 其振转能级寿命为  $7.1 \text{ ns}^{[12]}$ , 为获得有效的激光振荡, 在谐振腔内对  $\text{Na}_2 B^1 \Pi_u - X^1 \Sigma_g^+$  跃迁形成足够多次的放大, 所设计的谐振腔应尽可能小。取  $R = 6 \text{ cm}$ ,  $L = 8 \text{ cm}$ , 则要求热管炉窗片厚度  $t = 1.5 \text{ cm}$ 。令:  $\xi = 2.5$ , 则图 3 环形腔中  $x = 20 \text{ cm}$ ,  $\overline{M_1 M_4} = 2.53 \text{ cm}$ 。由 (9) 式得谐振腔稳定条件为  $6 \text{ cm} \leq L \leq 8.4 \text{ cm}$ 。因此, 所设计环形谐振腔是稳定的, 由 (14) 式得到此环形谐振腔热管炉中心处的高斯光束束腰  $w_0 = 2.99 \times 10^{-3} \text{ cm}$ 。由 (19) 式和 (20) 式得到实现泵浦激光与环形谐振腔匹配时, 对泵浦激光束腰位置和大小要求为

$$l = 10 \text{ cm}, \quad w_p = 8.97 \times 10^{-3} \text{ cm}.$$

## 六、结 论

由于二聚物三能级蒸气激光介质的增益相对于泵浦光方向具有显著的不对称特性, 采用环形谐振腔可以充分利用介质的喇曼增益, 降低激光振荡阈值。对于环形谐振腔引入的象散和慧差影响, 可以利用介质盒布儒斯特窗片实现象差补偿。

本文作者曾与康松高教授进行了有益讨论, 特此谢意。

## 参 考 文 献

- [1] B. Wellegehausen; *IEEE J. Quantum Electron.*, 1979, **QE-15**, No. 10 (Oct), 1108.
- [2] 方洪烈;《光学谐振腔理论》, (科学出版社, 1981 年), p. 397.
- [3] C. E. Wagstaff *et al.*; *J. Phys (D) · Appl. Phys.*, 1979, **12**, No. 3 (14 Mar), 355.
- [4] G. Marowsky; *IEEE J. Quantum Electron.*, 1973, **QE-9**, No. 2 (Feb), 245.
- [5] H. W. Schröder *et al.*; *Appl. Phys.*, 1977, **14**, No. 4 (Dec), 377~380.
- [6] J. Heppner *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1978, **33**, No. 7 (1 Oct), 590.
- [7] H. W. Kogelnik *et al.*; *IEEE J. Quantum Electron.*, 1972, **QE-8**, No. 3 (Mar), 373.
- [8] M. H. Dunn *et al.*; *Opt. Commun.*, 1977, **20**, No. 2 (Feb), 214.
- [9] H. Kogelnik *et al.*; *Appl. Opt.*, 1966, **5**, No. 10 (Oct.), 1550.
- [10] 周炳琨等;《激光原理》, (国防工业出版社, 1984 年), p. 106.
- [11] 李景镇主编,《光学手册》, (陕西科学技术出版社, 1986 年), p. 1036.
- [12] W. Demtröder *et al.*; *J. Mol. Spectrosc.*, 1976, **61**, 382.

## Design of ring laser resonator for dimer vapor with three-level system

LÜ ZHIWEI, WANG QI AND MA ZUGUANG

(*Institute of Opto-electronics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150006*)

(Received 6 August 1990; revised 5 November 1990)

### Abstract

In accordance with the asymmetric gain to the direction of pumping light in dimer vapor with three-level cycle, a stable laser resonator was designed to utilize the asymmetric gain.

The conditions of astigmatism and coma compensation and of match between the pumping laser and the resonator were given. And a concrete design of the ring resonator for  $\text{Na}_2 B^1\Pi_u - X^1\Sigma_g^+$  laser was shown in the paper.

**Key words:** dimer, three-level system, ring resonator.