

# 激光二极管端面抽运的 $1.34\mu\text{m}$ Nd :YVO<sub>4</sub> 三镜折叠腔型激光器 \*

尚连聚<sup>†</sup> 郑 义

( 曲阜师范大学物理系 , 曲阜 273165 )

( 2001 年 12 月 30 日收到 2002 年 1 月 28 日收到修改稿 )

理论上提出了三镜折叠腔的稳区理论 , 所得结论对设计激光器具有重要的指导意义 , 实验上实现了激光二极管端面抽运的  $1.34\mu\text{m}$  Nd :YVO<sub>4</sub> 三镜折叠腔型激光器的运转 .

关键词 : 激光二极管 , Nd :YVO<sub>4</sub> 晶体 , 折叠腔 , 往返矩阵 , 稳区图

PACC : 4255R , 4260B , 4260D

## 1. 引 言

激光二极管 ( diode-laser , LD ) 抽运的固体激光器具有高效率、紧凑、稳定、长寿命和光束质量高等优点 , 在军事、工业、医学和科研上有着广阔的应用前景 , 它的研究已成为激光器件领域内的一个非常活跃的方向<sup>[1]</sup>. 在适合激光二极管抽运的众多激光晶体中 , Nd :YVO<sub>4</sub> 晶体因其一系列优良的性质<sup>[2]</sup>而倍受人们青睐 , 它已经成为激光二极管抽运中小功率激光器的理想工作材料<sup>[3]</sup>. Nd :YVO<sub>4</sub> 晶体<sup>4</sup>F<sub>3/2</sub>—<sup>4</sup>I<sub>11/2</sub> 能级跃迁可产生  $1.34\mu\text{m}$  的激光 , 在该波长处的受激发射截面是  $(6 \pm 1.8) \times 10^{-19} \text{cm}^2$  , 与 Nd :YAG 晶体在  $1.06\mu\text{m}$  处的发射截面  $(4.6 \times 10^{-19} \text{cm}^2)$  相当 , 容易实现  $1.34\mu\text{m}$  激光振荡 .  $1.34\mu\text{m}$  波段是人眼安全区 , 同时与硅光纤低色散和低损耗的波长一致 , 因此  $1.34\mu\text{m}$  区域的激光在激光医学、光纤通信、光传感定位和中红外参量振荡的抽运源等领域有广泛的应用前景<sup>[4]</sup>. 我们成功设计了 LD 端面抽运的  $1.34\mu\text{m}$  Nd :YVO<sub>4</sub> 三镜折叠腔型激光器 .

## 2. 实验装置

如图 1 所示 , 实验中所采用的抽运光源 LD 是美国 SDL 公司生产的 SDL-3460-P6 型号 , 带光纤耦

合输出 , 光纤输出口径为  $600\mu\text{m}$  , 光纤数值孔径为 0.37 , LD 最大输出功率为 16W , 峰值波长在 808.9nm 处 , 光学耦合系统焦距约为 35mm , LD 光束经光学耦合系统后束腰半径为  $300\mu\text{m}$  , 图 1 中平凹镜曲率半径皆为 100mm ; Nd :YVO<sub>4</sub> 晶体由中科院物理所生长 , 晶体尺寸为  $3\text{mm} \times 3\text{mm} \times 5\text{mm}$  , 通光方向长度为 5mm , Nd :YVO<sub>4</sub> 晶体采用 *a* 轴切割 , Nd 离子掺杂浓度约为 0.7% , 实验中 , 将 Nd :YVO<sub>4</sub> 晶体固定在紫铜夹上 , 紫铜夹用净化了的水冷却 , 冷却水的温度采用 HX-10555 型恒温循环器进行控制 , 温度可在 10—40℃ 之间调节 , 温度控制精度为  $\pm 0.2^\circ\text{C}$  ; 为了保证晶体与紫铜夹严密接触 , 晶体侧面用铜片包裹 , 铜片的导热性能很好 , 这样能使晶体上的热量迅速传给紫铜夹并让循环水带走 , 整个水冷装置固定在五维调节架上 , 以便能准确调节晶体位置 , 保证抽运光相对于 Nd :YVO<sub>4</sub> 晶体呈  $\pi$  偏振 , 这样抽运更为有效 ; 为了抑制 Nd :YVO<sub>4</sub> 晶体中增益最强的  $1.06\mu\text{m}$  谱线起振 , 平平镜  $M_1$  的镀膜除满足对  $1.34\mu\text{m}$  全反和 808nm 高透外 , 还要同时对  $1.06\mu\text{m}$  高透 ; Nd :YVO<sub>4</sub> 晶体两端面镀  $1.34\mu\text{m}$  增透膜 , 以减小腔内的反射损耗 , 平凹镜  $M_2$  镀对  $1.34\mu\text{m}$  高反和对  $1.06\mu\text{m}$  高透的双色介质膜 , 平凹镜  $M_3$  镀膜对  $1.34\mu\text{m}$  光的透过率为 5.3% , 同时对  $1.06\mu\text{m}$  高透 , 它作为  $1.34\mu\text{m}$  激光的输出镜 .

\* 国家教育部回国留学人员资助基金和山东省教委二标项目基金资助的课题 .

<sup>†</sup> Email : shanglianju@mail. China. com 电话 0537 - 4453324 .

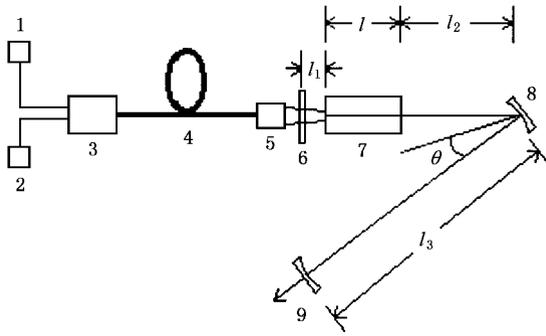


图1 LD抽运的1.34 $\mu\text{m}$  Nd:YVO<sub>4</sub>激光器的实验装置(1.LD驱动电源 2.LD温控器 3.LD 4.LD耦合光纤 5.光学耦合系统; 6.平面镜 M<sub>1</sub> 7.Nd:YVO<sub>4</sub>晶体 8.凹面镜 M<sub>2</sub> 9.平凹镜 M<sub>3</sub>)

### 3. 三镜折叠腔的稳区理论

折叠腔结构的激光器紧凑,但其工作稳区比较小.为了使激光器工作在稳区之内,我们用下面的理论作指导,选取腔长和折叠角以及调节光路.

#### 3.1. 谐振腔的稳态条件及像散补偿条件

设旁轴光线在腔内往返一周时的变换矩阵(往返矩阵)为

$$M_t = \begin{bmatrix} A_t & B_t \\ C_t & D_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l/n \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -2/R\cos\theta & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l_3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -2/R & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l_3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \\ \times \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -2/R\cos\theta & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l/n \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$M_s = \begin{bmatrix} A_s & B_s \\ C_s & D_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l/n \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -2\cos\theta/R & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l_3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -2/R & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l_3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \\ \times \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -2\cos\theta/R & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l/n \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

#### 3.3. 稳区图

根据谐振腔的稳态振荡条件及像散补偿条件,可以利用计算机画出三镜折叠腔的稳区图.我们在作稳区图时,以  $l_3$  和  $\theta$  为坐标变量作稳区图.这样作稳区图的原因有两个:一是因为短臂  $l_3$  和折叠角  $\theta$  的变化对稳区图的影响比较敏感;二是由于在实际光路中,激光介质长度  $l$  和平凹反射镜曲率半径  $R$  一般都已事先选定,而  $l_3$  和  $\theta$  在光路上比较容易

$$M_i = \begin{bmatrix} A_i & B_i \\ C_i & D_i \end{bmatrix},$$

令  $G_i = \frac{|D_i + A_i|}{2}$ ,  $i = t$  和  $i = s$  分别对应于子午面和弧矢面内的光束,则谐振腔的稳态振荡条件为  $G_t < 1, G_s < 1$ ,即子午面内的光束和弧矢面的光束同时满足稳态振荡条件时,谐振腔才是稳定腔.

根据谐振腔的稳态条件,采用 C 语言编制程序,可以利用计算机画出谐振腔的稳区图.谐振腔工作在稳区内并不一定能使输出光束实现像散补偿,为此采用 C 语言编制程序作稳区图时还需要同时实现像散补偿.我们利用 ABCD 定律<sup>[5]</sup>和高斯光束传输规律<sup>[6]</sup>得到输出镜上子午面内和弧矢面内的等

相位曲率半径  $r_i$  和光斑半径  $\omega_i$  分别为  $r_i = \frac{2B_i}{D_i - A_i}$ ,

$\omega_i = \sqrt{\frac{\lambda}{\pi} - \frac{2|B_i|}{\sqrt{4 - (D_i + A_i)^2}}}$ ,像散补偿条件为:  $r_t = r_s, \omega_t = \omega_s$ .因此,我们在采用 C 语言编制程序作稳区图时还需要同时满足  $r_t = r_s$  和  $\omega_t = \omega_s$ .

#### 3.2. 三镜折叠腔的往返矩阵

根据折叠腔的有关理论,我们可以写出三镜折叠腔在子午面内和弧矢面内的往返矩阵,它们分别为

调整<sup>[7]</sup>.作图时取激光介质长度  $l_1 = 7\text{mm}$ ,  $l = 5\text{mm}$ ,  $l_2 = 128\text{mm}$ ,  $R = 100\text{mm}$ ,  $n = 2.15$ .图 2 为相应的三镜折叠腔稳区图.

### 4. 光路参数、实验结果与分析

1. 在图 2 的指导下,选取  $l_3 = 65\text{mm}$ ,  $\theta = 10^\circ$  来设计激光器.实验中,LD 温度控制在  $22.3^\circ\text{C}$ ,当抽运功率为  $6.6\text{W}$  时,我们获得了  $1.8\text{W}$  的  $1.34\mu\text{m}$  激光

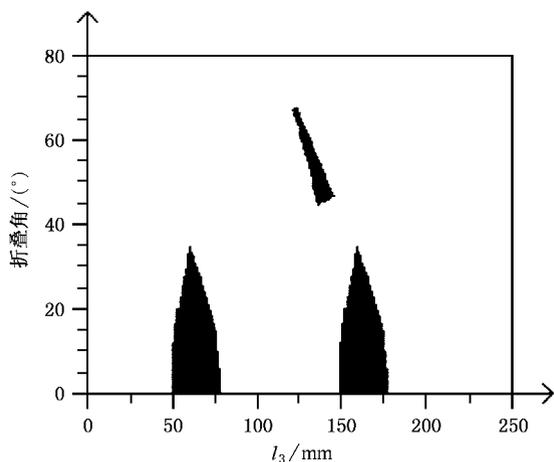


图 2 三镜折叠腔的稳区图

输出,光-光转换效率为 27.3%.

2. 选取  $l_3 = 160\text{mm}$   $\theta = 10^\circ$  来设计激光器,其他条件不变.当抽运功率为 6.6W 时, $1.34\mu\text{m}$  激光的输出功率为 1.5W,光-光转换效率为 22.7%.

在以上两种情况下,通过远场观察证明  $1.34\mu\text{m}$  激光输出为 TEM<sub>00</sub> 模.由于低功率抽运和水冷效果较好,Nd :YVO<sub>4</sub> 晶体均未表现出明显的热效应,长时间连续监测,激光输出功率不稳定性均小于 1%.

3. 当选取图 2 中稳区外的点来设计激光器时,均未获得激光输出.

4. 理论与实验结果十分符合,我们提出的稳区理论对设计折叠腔型激光器具有重要指导意义.目前常见的染料激光器、LiSAF 激光器和 LiCAF 激光器等都是采用折叠腔,设计时可用该理论作指导.另外,我们采取的研究方法不仅适用于三镜折叠腔,也适用于四镜、五镜、七镜等多镜折叠腔.

- [ 1 ] Zhang H L *et al* 1998 *Acta Phys. Sin.* **47** 1579( in Chinese ) 张恒利等 1998 物理学报 **47** 1579 ]
- [ 2 ] Wang C Q *et al* 1998 *Chinese Journal of Lasers* **25** 1129( in Chinese ) 王长青等 1998 中国激光 **25** 1129 ]
- [ 3 ] Wang C Q *et al* 1996 *Acta Optica Sinica* , **16** 1393( in Chinese ) 王长青等 1996 光学学报 **16** 1393 ]
- [ 4 ] Feng Y *et al* 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 335( in Chinese ) 冯 衍等 2001 物理学报 **50** 335 ]

- [ 5 ] Zhou B K , Gao Y Z and Chen J H 1995 *Principle of Laser*( Beijing : National Defense Industry Press ) p70( in Chinese ) 周炳琨、高以智、陈家骅 1995 激光原理(北京:国防工业出版社)第 70 页 ]
- [ 6 ] Wang Q P , Zhang X Y and Zhao S Z 1993 *Laser Physics*( Jinan : Shandong University Press ) p170( in Chinese ) 王青圃、张行愚、赵圣之 1993 激光物理学(济南:山东大学出版社)第 170 页 ]
- [ 7 ] Dymott M J P and Ferguson A I 1994 *Optics Letters* **19** 1989

## 1.34 $\mu\text{m}$ Nd :YVO<sub>4</sub> laser end-pumped by a diode-laser three-mirror folded cavity type \*

Shang Lian-ju Zheng Yi

( Department of Physics ,Qufu Normal University , Qufu 273165 , China )

( Received 30 December 2001 ;revised manuscript received 28 January 2002 )

### Abstract

The stability of three-mirror folded cavity is analyzed in theory. The conclusion we reached has important significance in guiding the design of the laser. The operation of Nd :YVO<sub>4</sub> laser emitting at  $1.34\mu\text{m}$  end-pumped by a diode-laser is achieved when the cavity is of the three-mirror folded cavity type.

**Keywords** : diode-laser , Nd :YVO<sub>4</sub> crystal , folded cavity , roundtrip matrixes , stable range figure

**PACC** : 4255R , 4260B , 4260D

\* Project supported by the Foundation of Repatriate Personnel Abroad of the Ministry of Education ,and the Foundation of Educational Committee 's Second level item of Shandong Province.