

文章编号: 1001-5078 (2006) 07-0544-04

# 高效率 TEM<sub>00</sub> 模绿光激光器动态稳定腔设计与实验研究

刘 磊, 王 旭, 刘 娟, 刘 朗, 张世文

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

**摘 要:**提出了动态稳定腔的分析和设计方法, 扩展了波面耦合理论在谐振腔设计中的应用, 并以两种具有不同动态热焦距的侧面抽运激光头为例设计了相应的动态稳定谐振腔。通过实验证明这两种动态稳定腔均具有较大的基模体积, 而且可以在额定抽运功率下稳定工作, 获得了 11.2W TEM<sub>00</sub> 模 532nm 激光, 单模绿光的电-光转换效率为 3.2%, 光-光转换效率 7.4% (808~523nm), 其重复频率为 10kHz, 脉宽 110ns, M<sup>2</sup> 为 1.8, 功率不稳定性 1.1% (RMS)。

**关键词:**绿光激光器; 动态稳定腔; TEM<sub>00</sub> 模

**中图分类号:** TN248.1 **文献标识码:** A

## Research of Dynamically Stable Resonator for Efficiency Diode Side-pumping TEM<sub>00</sub> mode Green Laser

LU I Lei, WANG Xu, LU I Juang, LU I Lang ZHANG Shi-wen

(North China Research Institute of Electro-optics, Beijing 100015, China)

**Abstract:** A dynamically stable resonator for diode side-pumping laser was discussed. A practical technique was described for measuring and calculating thermal lenses in diode side-pumping laser. Two kinds of dynamically stable resonator were designed and compared using by two laser module which had different thermal focal length respectively and successfully implemented. The dynamically stable resonators had large fundamental mode radius, and could obtain 11.2W TEM<sub>00</sub> mode 532nm output power with 10kHz repetition rate, 110ns pulsewidth, 1.8M<sup>2</sup> and 1.1% stability. The electrical-to-optical conversion efficiency and the optical-to-optical conversion efficiency were 3.2% and 7.4%, respectively.

**Key words:** green laser; dynamically stable resonator; TEM<sub>00</sub> mode

### 1 引 言

全固态绿光激光器由于具有效率高、光束质量好、运转可靠、体积小以及寿命长等优点, 使其在科研、工业和军事领域中得到了广泛的应用<sup>[1]</sup>。

近年来, 随着半导体激光器的技术进步, 全固态绿光激光器也取得了快速的发展, 2000年韩国 Susumu Konno 等采用双棒 L 型腔单端输出 136W 的绿光输出; 中国电子科技集团第十一研究所采用国产半导体激光器组件, 利用三镜 L 型腔, 也实现平均功率大于 100W 的绿光输出。国内大部分报道集中

在大功率的多模绿光激光器上, 已有高功率单模绿光激光器的报道, 我们采用以 Nd:YAG 为工作物质的二极管侧面抽运激光头, 采取声光调 Q 腔内倍频的方式, 通过动态稳定腔设计, 实现了重复频率达 0~50kHz 在 10kHz 时输出功率 11.2W、脉宽 110ns 的单模绿光输出<sup>[2-3]</sup>。

作者简介: 刘 磊 (1978 - ), 男, 助工, 硕士, 主要从事二极管抽运固体激光器的研究。

收稿日期: 2006-03-15; 修订日期: 2006-04-14

## 2 动态稳定腔设计

### 2.1 热效应分析

热效应是影响二极管侧面抽运固体激光器的激光输出光束质量的主要因素。一般情况下,二极管抽运的 Nd:YAG激光器中晶体的发热量仅是灯抽运的三分之一,为了获得很好的激光输出模式,一般情况下会选用直径较小的工作物质,计算棒状工作物质的热焦距的公式如下<sup>[4]</sup>:

$$f = \frac{KA}{P} \left[ \frac{1}{2} \frac{dn}{dT} + C_{\alpha} \phi n_0^3 + \frac{n_0(n_0 - 1)}{L} \right]^{-1} \quad (1)$$

其中, K为工作物质导热系数; A为棒的截面积; P为激光棒吸收功率;  $n_0$ 为激光棒半径;  $\alpha$ 为热膨胀系数;  $n_0$ 为棒中心折射率;  $C_{\alpha}$ 为工作物质弹光系数的函数; L为棒长度。根据(1)式可知,热透镜焦距长短与工作物质的截面积成正比,理论上认为,用细棒作为工作物质的二极管侧面抽运激光头的热焦距一般情况下都很短,这一点在谐振腔设计中应特别注意。但是按照式(1)计算热透镜焦距,需要知道与棒吸收功率有关的冷却液的质流比、雷诺数、普朗特数等参数,然而根据不同冷却结构计算这些对应参数时是非常繁杂的,而且经常会与实际值有较大偏差,所以一般情况下都是采用实际测量的方式来得到准确的热焦距数值。将工作介质等效为厚透镜时如图1所示,  $f$ 为热透镜焦距; 工作物质长度为  $l$  折射率为  $n$ ; 则热透镜主平面到工作物质端面的距离<sup>[5]</sup>:

$$l = \frac{l}{2n} \quad (2)$$

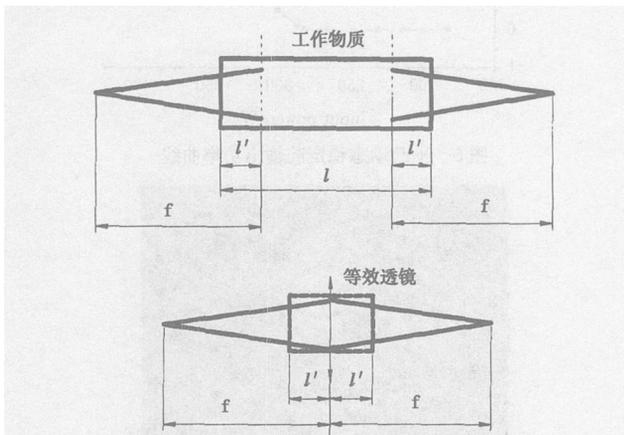


图1 热透镜焦距及主平面位置

Nd:YAG晶体折射率  $n = 1.82$ , 长度 65mm, 通过(2)式可以计算出  $l = 18\text{mm}$ 。

当设计谐振腔时可以将热透镜等效为一个焦距

为  $f$  的薄透镜, 根据(2)式可知此时的腔长应该减去如下的一部分:

$$l = \frac{l(n-1)}{n} \quad (3)$$

通过图2所示的实验装置, 可以测量得到在一定抽运功率下晶体端面到接收屏的距离  $f$ , 则热透镜焦距:

$$f = f + l \quad (4)$$

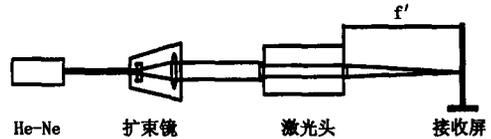


图2 二极管侧面抽运激光头热焦距测量装置

通过上述方法, 测量并计算后得到了 A型和 B型两种侧面抽运激光头在不同注入下的热焦距。A型激光头采用长度 65mm、直径 2mm、掺杂 0.6%的 Nd:YAG圆棒, 1064nm 激光额定输出功率 35W; B型激光头采用长度 65mm、直径 3mm、掺杂 0.6% Nd:YAG圆棒, 1064nm 激光额定输出功率 50W。这两种激光头采用同等级激光二极管泵浦源和相同的抽运结构, 24A时注入电功率 390W, 输出 808nm 激光 180W, 测量其热焦距时采用的水冷系统压强为 100kPa, 水温 22℃, 结果如图3所示。

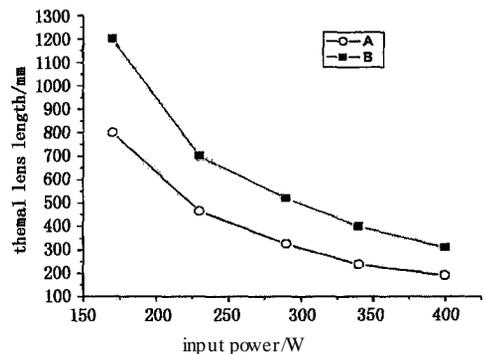


图3 A和B型聚光头热焦距测量曲线

从图3可以看出, 同等注入功率下, 工作物质直径较细(2mm)的激光头的热焦距, 明显小于工作物质直径较大(3mm)的激光头, 这与公式(1)的分析结果相吻合。

### 2.2 动态稳定谐振腔设计

下面以 A型和 B型两种不同热焦距的侧面抽运激光头为例设计相应的动态稳定谐振腔。腔内包含有薄透镜的等效谐振腔的相关参量为:

$$g_1 = 1 - \frac{L_2}{f} - \frac{L_0}{R_1}, \quad g_2 = 1 - \frac{L_1}{f} - \frac{L_0}{R_2} \quad (5)$$

式中,  $L_0 = L_1 + L_2 - (L_1 L_2 / f)$ ;  $f$  为薄透镜焦距; 可以根据式 (4) 测理后计算得到;  $L_1$ 、 $L_2$  分别为全反镜 M1 和输出镜 M2 与热透镜之间的光学距离。

A 型激光头额定工作时  $f = 200\text{mm}$ , 如果谐振腔输出镜采用平面镜 ( $R_2 = \infty$ ), 腔长  $L = 560\text{mm}$ , 薄透镜位于谐振腔的中心 ( $L_1 = L_2 = L/2 = 280\text{mm}$ ), 根据谐振腔稳定条件 ( $0 < g_1 g_2 < 1$ ) 和式 (5) 可以得到  $R_1 > 80\text{mm}$  或  $R_1 < -420\text{mm}$ , 其中  $R_1 > 80\text{mm}$  时谐振腔为平凹腔, 可以计算出这时谐振腔稳定条件范围为  $0.16 < g_1 g_2 < 1$ , 如果取  $R_1 = 200\text{mm}$ , 得到  $g_1 g_2 = 0.5$ , 此时谐振腔则对光学和机械扰动最不灵敏; 当  $R_1 < -420\text{mm}$  时谐振腔为平凸腔, 这时谐振腔稳定条件范围为  $0 < g_1 g_2 < 0.16$ , 找不到一个对扰动不敏感的  $R_1$ , 综合考虑, A 型激光头在这种腔长和输出镜条件下选用平凹动态稳定腔的腔型比较合理。

B 型激光头额定工作时  $f = 350\text{mm}$ , 如果谐振腔输出镜采用平面镜 ( $R_2 = \infty$ ), 腔长  $L = 400\text{mm}$ ,  $L_1 = 150\text{mm}$ ,  $L_2 = 250\text{mm}$ , 根据谐振腔稳定条件 ( $0 < g_1 g_2 < 1$ ) 和式 (5) 可以得到  $R_1 > 1015\text{mm}$  或  $R_1 < -90\text{mm}$ , 在  $R_1 > 1015\text{mm}$  时谐振腔为平凹腔, 可以计算出这时谐振腔稳定条件范围为  $0 < g_1 g_2 < 0.08$ , 找不到一个对扰动不敏感的  $R_1$ ; 在  $R_1 < -90\text{mm}$  时谐振腔为平凸腔, 这时谐振腔稳定条件范围为  $0.08 < g_1 g_2 < 1$ , 如果取  $R_1 = -200\text{mm}$ , 得到  $g_1 g_2 = 0.5$ , 此时谐振腔则对光学和机械扰动最不灵敏。综合考虑, B 型激光头在这种腔长和输出镜条件下选用  $R_1 = -200\text{mm}$  的平凸动态稳定腔的腔型比较合理, 两种动态稳定腔耦合原理如图 4。

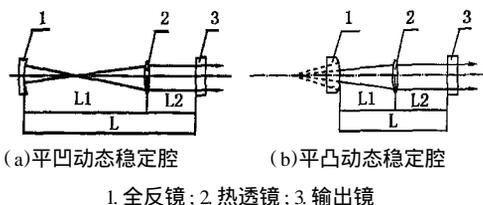


图 4 两种动态稳定腔波耦合原理示意图

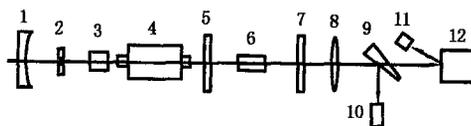
事实上以上对谐振腔的分析研究符合球面波耦合原理, 也与经典凹凸非稳腔的理论类似, 在使用 A 型激光头, 而选定的平凹动态稳定腔的全反面球心与热焦距焦点在腔内重合, 在使用 B 型激光头, 而选用的平凸动态稳定腔的全反面球心与热焦距的焦点在腔外重合。在这两种腔型中, 当激光球面波前与全反镜面重合时, 激光将原路返回, 在经过工作物

质热透镜的准直作用, 通过平面输出镜输出, 输出光束的发散角得到了最大的压缩, 此时的谐振腔恰好均为热不灵敏腔。利用波面耦合的谐振腔设计方法可以不通过计算, 只要知道工作物质的动态热焦距, 就可以迅速地设计出符合实际要求的动态稳定谐振腔, 大大简化了谐振腔设计过程。

实际应用中需要考虑的因素很多, 如谐振腔总腔长  $L$  一般不能很长, 同时  $L_1$  也不能太短等, 在选择谐振腔过程中, 要根据热透镜焦距的大小通过分析计算选择合理的腔型。

### 3 实验结果与讨论

为了研制出高效率单模绿光激光器, 首先通过实验对前文通过理论计算得出的两种谐振腔结构进行比较, 谐振腔结构示意图如图 5 所示。



- 1. 全反镜; 2. 光阑; 3. 声光 Q 开关; 4. 激光头; 5. 二向色镜;
- 6. KTP 晶体; 7. 输出镜; 8. 聚焦透镜; 9. 分光楔型镜;
- 10. 光束分析仪或  $M^2$  测试仪; 11. 光电二极管; 12. 功率计

图 5 实验装置示意图

#### 3.1 平凸动态稳定腔实验结果

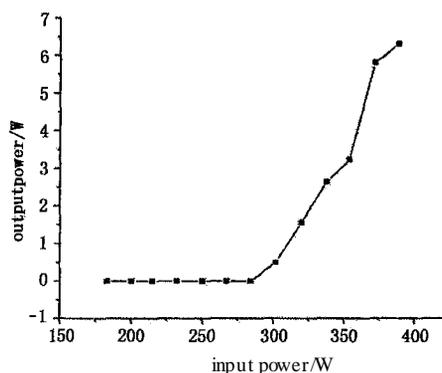


图 6 平凸动态稳定腔输出功率曲线

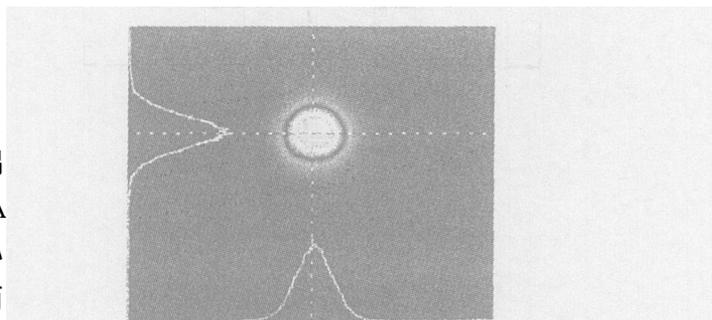


图 7 平凸动态稳定腔输出绿光斑图

采用 B 型激光头, 工作物质为长度 65mm、直径 3mm、掺杂 0.6% 的 Nd:YAG 圆棒, 24A 时输出

808nm抽运激光功率 180W。全反镜曲率半径  $R_1 = -200\text{mm}$  镀有 1064nm 全反膜,将  $\phi 1.5\text{mm}$  光阑靠近全反镜一端,50W 声光 Q 开关,二向色镜镀有 1064nm 增透膜和 532nm 全反膜,二类匹配倍频晶体 KTP 尺寸为  $5 \times 5 \times 10\text{mm}^3$ ,输出镜镀有 1064nm 全反膜和 532nm 增透膜,腔长为 400mm。利用如图 5 所示的实验装置,在工作电流为 24A,工作电压 16.2V 时得到 6.2W TEM<sub>00</sub> 模 532nm 激光,单模绿光的电-光转换效率为 1.5%,光-光转换效率 3.4%,其重复频率为 10kHz,脉宽为 80ns,全光束高斯光束耦合率 97%,功率不稳定性 1.7% (RMS),用 Spiricon 公司 M<sup>2</sup>200 测试仪测得 M<sup>2</sup> 为 1.9。图 7 为 Spiricon 公司 LBA-PC 型光束分析仪采集的输出激光光斑。

### 3.2 平凹动态稳定腔实验结果

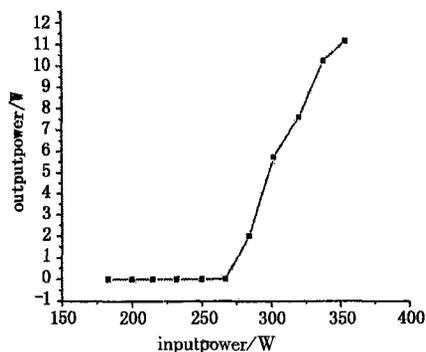


图 8 平凹动态稳定腔输出功率曲线

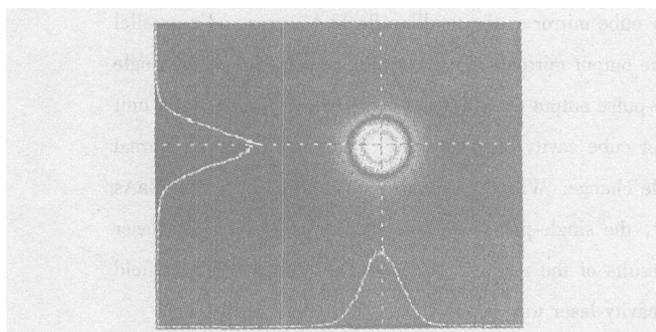


图 9 平凹动态稳定腔输出绿光光斑图

采用 A 型激光头,工作物质为长度 65mm、直径 2mm、掺杂 0.6% 的 Nd:YAG 圆棒,22A 时输出 808nm 抽运激光 150W。全反镜曲率半径  $R_1 = -200\text{mm}$  镀有 1064nm 全反膜,由图 4 可知激光束腰在腔内的位置,将  $\phi 0.8\text{mm}$  光阑放置在激光束腰处,NEOS 声光 Q 开关,二向色镜镀有 1064nm 增透膜和 532nm 全反膜,二类匹配倍频晶体 KTP 尺寸为  $5 \times 5 \times 10\text{mm}^3$ ,输出镜镀有 1064nm 全反膜和 532nm

增透膜,腔长为 560mm。利用如图 5 所示的实验装置,在工作电流为 22A,工作电压 16.1V 时得到 11.2W TEM<sub>00</sub> 模 532nm 激光,单模绿光的电-光转换效率为 3.2%,光-光转换效率 7.4%,其重复频率为 10kHz,脉宽为 110ns,发散角为 1.9mrad,全光束高斯光束耦合率 98%,功率不稳定性 1.1% (RMS),用 Spiricon 公司 M<sup>2</sup>200 测试仪测得 M<sup>2</sup> 为 1.8。图 9 为 Spiricon 公司 LBA-PC 型光束分析仪采集的输出激光光斑。

### 3.3 实验结果讨论

通过上述实验发现,这两种动态稳定腔的激光输出阈值都比较高,这是因为抽运光功率在阈值以下时工作物质形成的热透镜焦距不能补偿全反镜的发散效果,随着抽运功率增加热焦距变短,谐振腔逐渐变成动态稳定腔 ( $0 < g_1 g_2 < 1$ ),此后输出功率迅速增加,斜效率分别为 6% 和 13%。在同样抽运光功率下,采用较细激光工作物质可以得到更高的 TEM<sub>00</sub> 模绿光输出效率。需要指出的是,很多论述连续或准连续绿光激光器的文献中的光-光效率为 1064~532nm 的效率,但是我们认为这种计算方法存在最佳输出耦合率、腔型、激光模式等方面带来的误差,确切地讲应是倍频效率,所以本文中采用相对较准确的 808~532nm 的转换效率作为光-光转换效率。经过实践检验,这两种动态谐振腔均可以长时间稳定工作,满足产品级激光器的要求。

### 参考文献:

- [1] N Hodgson, D Dudley, L Gruber, et al Diode end-pumped TEM<sub>00</sub> Nd:YVO<sub>4</sub> laser with output power greater than 12 W at 355 nm [A]. Technical Digest of CL EO', 2001, 389 - 394
- [2] S Konno, T Kojima, S Fujikawa, et al High average power, high-repetition, diode-pumped third-harmonic Nd:YAG laser [A]. Technical Digest of CL EO', 2001, 391 - 395
- [3] 王玉英. 工业用激光器现状 [J]. 激光技术与应用, 2004, 9.
- [4] W. 克希奈尔. 固体激光工程 [M]. 北京: 科学出版社, 2002
- [5] V S Emolaev, S B Biryuchinski, M V Inochkin Study of the thermal lens in a 150-W solid-state processing laser with semiconductor pumping [J]. J. Opt Technol, 2003, 70(11): 789 - 793.