

doi: 10.7690/bgzdh.2014.07.005

高功率固体激光器非稳定谐振腔设计

邹璐¹, 金倩², 周平², 梅林², 朱晶晶²

(1. 通快(中国)有限公司激光部, 北京 100072; 2. 中国北方车辆研究所信息与控制技术部, 北京 100072)

摘要: 针对传统稳定谐振腔在高功率时光束质量变差的问题, 设计了一种高功率固体激光器非稳定谐振腔。从提高激光器输出功率和改善光束质量的角度出发, 以渐变反射率镜作为输出镜来设计非稳定谐振腔。在大功率输出的情况下, 对工作物质的热焦距进行测量, 根据测量的结果优化大功率输出时的谐振腔具体参数, 并进行试验分析。结果表明: 该方法能输出能量均匀的激光束, 使大部分能量集中在中央, 对一些工业加工领域具有重要的参考意义。

关键词: 非稳定谐振腔; 光束质量; 渐变反射率镜; 热焦距

中图分类号: TP302 **文献标志码:** A

Unstable Resonator Design for High Power Solid-State Laser

Zou Lu¹, Jin Qian², Zhou Ping², Mei Lin², Zhu Jingjing²

(1. Laser Department in TRUMPF, Beijing 100072, China;

2. Department of Information & Control Technology, China North Vehicle Research Institute, Beijing 100072, China)

Abstract: The traditional stable resonator was not easy to get high power and high beam quality at the same time. To solve this problem, design a high-power solid-state laser unstable resonator. That proposed an unstable resonator with variable reflectivity mirror as output mirror to improve the beam quality when use high power. Then measure the thermal focal length at high output power when the laser working. As the measure value to optimize the unstable resonator for high power laser output, then experiment and analyzed the measurement results. Those data show that it can get the uniform laser, and most of the energy was in the middle of the laser beam. That has significance for some industrial areas.

Keywords: unstable resonator; beam quality; variable reflectivity mirror; thermal focal length

0 引言

当今时代, 激光应用的许多领域都要求激光光束在高功率输出的同时具有尽可能好的光束质量, 以便提高其方向性、精确性和加工精度。比如激光打孔、划片、微加工等都要求激光束具有高的聚焦性能, 在功率一定的情况下, 使激光经过透镜聚焦后作用在单位面积上的能量密度增大, 以便达到更好的效果。

光学谐振腔是激光器的重要组成部分, 由输出镜和全反镜构成, 选择不同的参数将直接影响激光器的功率输出、光束发散角、光束质量、激光模式、光斑大小和谐振频率。光学谐振腔主要分稳定谐振腔、介稳定谐振腔和非稳定谐振腔 3 大类。稳定谐振腔往往在同时获得高输出功率、高光束质量方面矛盾比较突出, 即如果激光器功率高, 往往是多模输出, 光束质量差, 而要获得高光束质量的激光输出, 则限制了增益介质的激活体积, 输出激光功率低。如果在高增益激光系统设计中采用非稳定谐振腔会是一个比较好的解决方法, 它能使单模运转体积充满整个介质, 输出功率相对较大, 并有很好的光束质量^[1]。

然而传统非稳定谐振腔的基模衍射损耗比较大。因为其输出镜是中心镀全反膜, 边缘镀增透膜的镜片。其输出近场光束是一个环状光斑, 而远场产生衍射环, 能量分布分散; 因此, 笔者设计一种渐变反射率镜(variable reflectivity mirror, VRM)作为非稳定谐振腔的输出镜, 可以使其输出能量均匀的激光束, 使大部分能量集中在中央^[2-4]。在实际运行过程中, 由于输入能量大, 会不可避免地产生热透镜效应, 这样, 原先的光场分布由于热透镜效应的影响将导致光束传输发生变化。若在设计谐振腔时能有效地对其进行热补偿, 则能够获得较好的光束质量^[5]。

1 系统设计与实验

1.1 无热透镜效应下非稳定谐振腔设计

如图 1, 虚共焦非稳定谐振腔由 2 个曲率半径不同的球面反射镜按虚共焦状态组成。可以看出, 其两球面反射镜焦点重合, 轴上的共扼像点一个位于公共焦点, 另一个位于无穷远处。因此在谐振腔内的基本波型为一对球面-平面波型, 通常采用平面波型的输出的方式^[6]。

收稿日期: 2014-03-03; 修回日期: 2014-04-01

作者简介: 邹璐(1982—), 男, 吉林人, 硕士, 工程师, 从事碟片、光纤式大功率固体激光器及其应用研究。

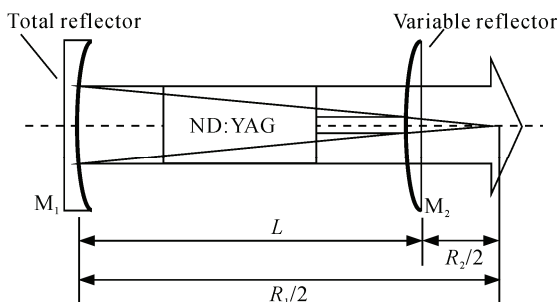


图 1 虚共焦非稳定谐振腔

如图 1，以高斯曲线形 VRM 作为输出镜，它对于 1 064 nm 波长的中心反射率为 64%，高斯函数的阶数 $n=2$ ，反射率沿径向方向递减，满足公式：

$$R(r) = R_{\max} \exp[-2(r/\omega_m)^n]$$

式中： R_{\max} 为中心最大反射率； r 是径向距离； ω_m 为高斯函数的“腰半径”； n 为高斯函数的阶数。

在试验中选用工作物质和电源参数如表 1。

表 1 工作物质和电源参数

工作物质	参数	电源	参数
ND:YAG/mm	6×100	单次脉冲宽度/ms	1.5
工作物质折射率	1.82	输入电压/V	350
工作物质掺杂浓度/%	0.8	工作电容容量/ μ F	25 000
		氩灯/mm	7×120

取 M_2 的曲率半径 $R_2=1\ 000$ mm，等效菲尼耳系数 $N_{EQ}=1.5$ ，根据公式：

$$L = -\frac{1}{2}|R_2| + \frac{1}{4}D(R_2/\lambda N_{EQ})^{1/2}$$

可以算得腔长 $L=690$ mm，然后将 L 和 R_2 代入下面 2 个公式，可以求出 $M=2.4$ ， $R_1=2\ 380$ mm。

$$M = \frac{R_1}{R_2} \quad L = f_1 - f_2 = R_1/2 - R_2/2$$

将设计好的参数应用于实际激光器系统中时，需要考虑晶体折射率对整个腔体长度的影响，来确定实际谐振腔的长度 $L_{实}$ 。

设腔内工作物质折射率为 μ ，长度为 l ，考虑到折射效应后，轴向球面波会聚点将由空腔时的点 G 变到点 F ，也就是 M_1 的实际焦点移至 $\Delta L + R_1/2$ 。为保证两镜的焦点仍重合，谐振腔的长度应增加 ΔL ，由图 2 中几何关系得 $\Delta L = l(1-1/\mu)$ ，所以实际谐振腔的长度 $L_{实}$ 与空谐振腔的长度 L 之间的关系为 $L = L_{实} - l(1-1/\mu)$ ，算得实际谐振腔长度 $L_{实}=735$ mm。

实验中取工作电压 $u_0=350$ V，脉冲宽度 $\Delta t=1.5$ ms，负载电阻 $R=2$ ， $C=250\ 000$ μ F。可以算得单次的泵浦能量为 87 J，用能量计测得脉冲能量为 2.8 J。

用长焦距 $f=1\ 600$ mm 透镜将输出的激光聚焦后打在染黑的铝板上，测得交点上的光斑直径

$d=0.825\ 3$ mm，如图 3。

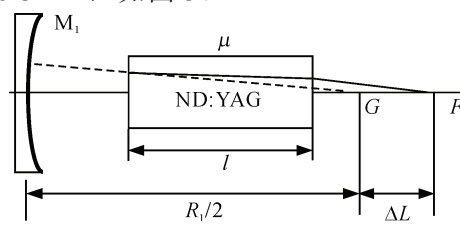


图 2 由工作物质引起的谐振腔长度修正

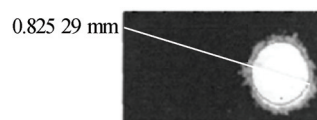


图 3 用影像测量仪测量聚焦后的光斑图像

根据公式 $\theta=d/f$ ，可得发散角为 0.5 mrad，测得输出激光的束腰为 5 mm，可得光束质量为 2.5 mm·mrad。

在相同的条件下将渐变反射镜换成透射率为 40% 的部分反射镜作为输出镜，曲率半径 $R_2=\infty$ ，全反射镜曲率半径 $R_1=10$ m，用成稳定谐振腔进行实验测量，和所设计的非稳定谐振腔作对比，对比实验参数见表 2。

表 2 稳定谐振腔和非稳定谐振腔输出结果对比

谐振腔	输出能量/J	光束质量/(mm·mrad)
稳定谐振腔	2.9	15
虚共焦非稳定谐振腔	2.8	2.5

在输入功率相同时，笔者设计的非稳定谐振腔单次获的输出能量基本和稳定谐振腔输出的相同。说明在高增益的情况下，虽然高阶模式的光束经多次反射后溢出腔外，有一定的损耗，但是基模光束可以基本上充满整个工作物质，获得较大的增益，输出能量并不亚于稳定谐振腔。并且用 VRM 作为输出镜，使得能量更集中，它和非稳定谐振腔的结合可以获得非常好的光束质量^[7]。

1.2 热效应的影响和测量

试验中采用前面所设计的非稳定谐振腔结构，并且保持电源的输入电压和脉冲宽度不变，将电源的脉冲频率逐渐加大到 50 Hz，来提高输入功率，输出功率-输入功率的转换效率曲线如图 4。

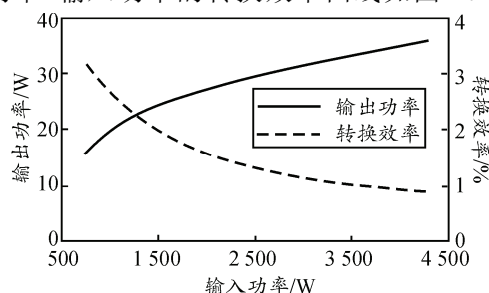


图 4 功率转换效率曲线

从图中可以看出，激光器的输出功率和输入功率不是线性关系，随着泵浦功率的增高，光电转换效率就会降低。这是因为随着温度增加，晶体发生热畸变，产生热透镜效应，如图 5。

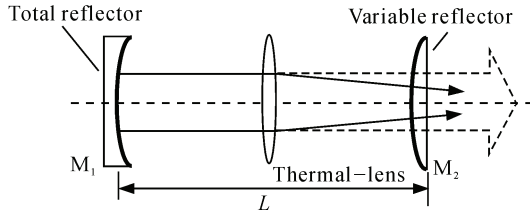


图 5 谐振腔内产生热透镜效应的虚共焦系统

图中，虚线代表没有热效应正常输出的激光光束，而实线则为产生热效应后改变方向的激光光束。热透镜效应产生后，谐振腔内光束震荡路径改变，使得模式发生改变。如果是单模震荡，会使单模体积缩小，输出功率降低，光束质量变坏^[8]。

由于热焦距与多种因素有关。在不同的脉冲频率和注入功率下，其理论值很难反应它的变化情况，所以这里采用实际测量热焦距的方法，如图 6。

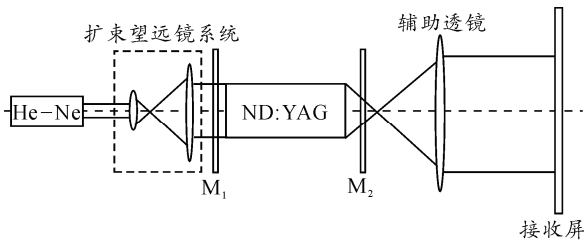


图 6 热焦距测量原理

笔者用 He-Ne 激光器作为指示光，当 He-Ne 激光经过扩束系统以后，通过产生热透镜效应的工作物质会发生会聚。如果在输出端后方附加一个辅助正透镜，可以沿光轴方向前后移动该辅助透镜的位置，这样当从辅助薄透镜出射的光近似为平行光时，产生的热透镜与后面辅助透镜正好构成了一套望远镜系统^[9]。可以通过沿着光轴方向调节接受屏的位置，当任意 2 个位置的光斑尺寸近似相等时，则可以认为辅助透镜后发出的为平行光。

设工作物质到薄透镜的间距为 L ，热透镜焦距为 f_T ，辅助薄透镜的焦距为 f_0' ，它们之间有 $L = f_T + f_0'$ 。在输入功率为 4 000 W 时，测得热焦距 $f_T = 540$ mm。

1.3 带有热效应的非稳定谐振腔设计

根据输入功率为 4 000 W 时所测得的热焦距，对上面所设计的非稳定谐振腔进行修正。首先，根据下面公式对 M_2 的曲率半径 R_2 进行修正。

$$\frac{1}{R_2} = \frac{1}{f_T} \left| 1 - \frac{a}{f_T} \right| + \frac{1}{R_2'} \left| 1 - \frac{a}{f_T} \right|^2$$

式中 a 为棒心与输出镜之间的距离， $a = 200$ mm。取 $R_2' = 1\ 000$ mm，可以得 $R_2 = 640$ mm。之后根据前面的设计步骤重新计算，可以得出一组新的虚共焦非稳定谐振腔参数，如表 3。

表 3 带有热效应的谐振腔参数

修正后的虚共焦非稳定谐振腔	参数值
理论谐振腔长度/mm	630
实际谐振腔长度/mm	675
工作物质(ND:YAG)直径/mm	6
工作物质(ND:YAG)长度/mm	100
M_2 曲率半径/mm	1 000
M_1 曲率半径/mm	1 900
放大率	3
输出耦合率/%	89

同样并且保持电源的工作电压和单次泵浦的脉冲宽度不变，将电源的脉冲频率逐渐加大到 50 Hz，得到最大平均输出功率为 125 W，图 7 为输出-输入功率曲线。

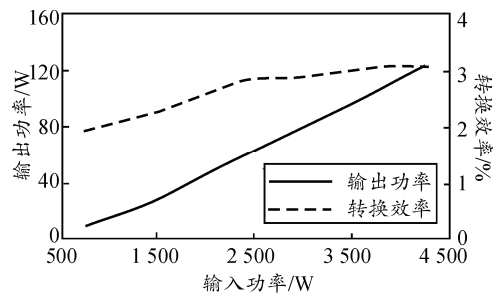


图 7 功率转换效率曲线

在输出功率为 125 W 时，从测量聚焦光斑的直径可以算出发散角为 0.8 mrad，测得输出激光束腰为 6 mm，可得其光束质量为 4.8 mm · mrad。

从图 8 中可以看出，在输入功率较低的情况下，激光器效率较低，随着泵浦功率的增加，激光器效率也随之逐渐增加。这是因为整个非稳定谐振腔的参数是按照在泵浦功率 4 000 W 时产生的热透镜重新设计的。在设定的泵浦功率下，所设计的非稳定谐振腔的输出效率超过了 3%，并且光束质量小于 5 mm · mrad。

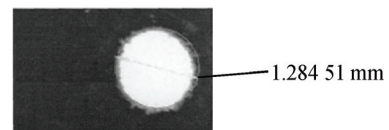


图 8 影像测量仪测量聚焦后光斑在相纸上的图样

2 结束语

笔者研究和设计了一种能产生高平均功率并具

有较高光束质量的激光器谐振腔。该腔体采用了非稳定式结构，并用 VRM 作为输出镜代替传统的输出方式，使得输出光斑的近场不再是圆环，并且远场大部分能量集中在光斑的中间。根据一定功率下产生的热透镜效应，笔者对该腔体参数做了修正，得到了比较理想的结果，这些结果对工业上的一些加工领域，比如打孔、划片等具有重要的参考意义。

参考文献：

[1] 魏青, 魏在福. 均匀相位辐合输出镜非稳腔的模式分析[J]. 强激光与粒子束, 1999, 11(4): 393-396.
 [2] 罗时荣, 吕百达, 黄鹭. 虚共焦非稳腔束散角的研究[J]. 激光技术, 1999, 23(5): 46-49.
 [3] 周大正. 光学非稳腔的新进展[J]. 强激光与粒子束,

1993, 5(3): 52-55.
 [4] 常兵, 蔡希洁, 李庆国. 变反射率镜非稳腔优化研究—超高斯途径[J]. 光学学报, 1995, 15(8): 977-982.
 [5] 余本海, 倪永军, 娄国营. Nd: YAG 激光器的热透镜效应及其对激光输出的影响[J]. 信阳师范学院学报: 自然科学版, 2004, 17(2): 116-119.
 [6] W. 克希耐尔. 固体激光工程[M]. 孙文, 江泽文, 程国祥, 译. 北京: 科学出版社, 2002: 23-25.
 [7] 吕百达. 光束变换光学和光束质量研究的某些新进展[J]. 激光杂志, 1997, 18(4): 126-127.
 [8] 吕百达, H. Weber. 固体激光器的光泵浦热效应和折射力[J]. 量子电子学, 1985, 2(3): 236.
 [9] 余本海, 倪永军, 娄国营. Nd: YAG 激光器的热透镜效应及其对激光输出的影响[J]. 信阳师范学院学报: 自然科学版, 2004, 17(2): 116-119.

(上接第 10 页)

随着弹丸的不断前进，弹底空间的不断增大等因素，比值 τ 是不断降低的，曲线显示出降低速率呈现先变大后变小的趋势。在弹丸离开枪口时最小，为 0.595 2。

图 8 为内弹道时期膛底的压力 p 随时间 t 的变化曲线图。

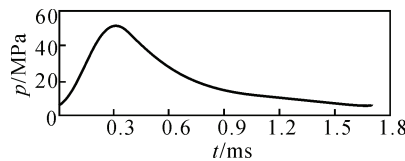


图 8 膛底 $p-t$ 曲线

变化规律与弹底的 $p-t$ 曲线图类似。 $t=0.003\ 3$ ms, 即弹丸刚启动时，出现最小值，为 5.143 9 MPa; $t=0.313\ 5$ ms 时，出现最大值，为 52.405 6 MPa。

图 9 为内弹道时期膛底火药混合相密度 ρ 随时间 t 的变化曲线图。

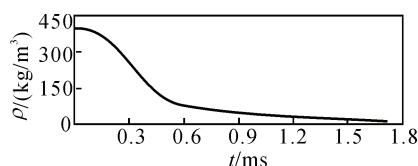


图 9 膛底 $\rho-t$ 曲线

变化规律与弹底的 $\rho-t$ 曲线图类似。弹丸开始运动时最大，为 $401.584\ \text{kg/m}^3$ ；弹丸离开枪口时，出现最小值，为 $14.482\ 5\ \text{kg/m}^3$ 。

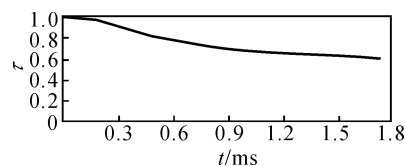


图 10 膛底 $\tau-t$ 曲线

图 10 为内弹道时期膛底火药温度与火药定容

燃烧温度比值 τ , 随时间 t 的变化曲线图。

变化规律与弹底的 $\tau-t$ 曲线图类似。弹丸离开枪口时，出现最小值，为 0.597 5。

4 结论

1) 在内弹道时期的任一时刻，最大压力始终出现在膛底，并沿着枪膛轴线方向呈缓慢下降趋势。

2) 内弹道时期，弹底压力和膛底压力都呈现先增大，达到某一最大值后再减小的趋势。最小值都出现在弹丸刚启动时。

3) 内弹道时期，弹底和膛底的火药混合相密度、火药温度与火药定容燃烧温度比都不断降低，且降低速率呈现先变大，后变小的趋势。

参考文献：

[1] 郭烈锦. 两相与多相流体力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002: 2-4.
 [2] 倪志军, 周克栋, 赫雷. 准两相流理论在金属风暴武器系统上的应用[J]. 弹箭与制导学报, 2006, 26(1): 427-430.
 [3] 周彦煌, 张领科, 陆春义, 等. 一种两相流点火模型及数值模拟[J]. 兵工学报, 2010, 31(4): 414-418.
 [4] 华东工学院 103 教研室. 内弹道学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1987: 125-128.
 [5] 王升晨, 周彦煌, 刘千里, 等. 膛内多相燃烧理论及应用[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1994: 67-71.
 [6] 金志明, 翁春生. 高等内弹道学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 129-130.
 [7] 廖振强, 王涛, 余世海. 武器气体动力学数值计算方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005: 242-243.
 [8] 袁光林. 身管武器变初速发射机理与控制技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2007: 5-6.
 [9] 金志明, 袁亚雄. 内弹道气动力学原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1983: 70-71.