

单宽域有效动态稳定腔的理论与实验研究

王 建

徐荣青 夏厚勤

(扬州大学工学院, 扬州, 225009)

(华中理工大学激光技术与工程研究院, 武汉, 430074)

摘要: 根据谐振腔理论, 详细分析了内含热透镜的平凹腔的动态稳定性。指出在某一特定情形下, 平凹腔可以只存在单一的稳定区。在此基础上, 笔者以最佳输出功率曲线为目标, 选择了一组腔参数, 实验结果表明, 该激光器在较宽的泵浦功率范围内, 其输出功率与输入呈现良好的线性关系。

关键词: 热透镜效应 激光谐振腔 动态稳定性 输出功率

Theoretical and experimental research on laser cavity with wide dynamic stability zone

Wang Jian

(College of Technology, Yangzhou University, Yangzhou, 225009)

Xu Rongqing, Xia Houqing

(Institute of Laser Technology & Engineering, HUST, Wuhan, 430074)

Abstract: Based on cavity theory, the characteristics of dynamic stability zone of a parallel-concave laser cavity are analyzed in detail, taking account of thermal lens effect equivalent to convex lens. In general, the laser with parallel-concave cavity can operate in one of two dynamic stability zones. We found that, in a special case, the parallel-concave cavity has only one dynamic stability zone. According to theoretical analysis, we selected a set of cavity parameters and carried out the experiments, taking Nd:YAG as an example. The results show that the output power of laser increase with the pumping power in a rather wide range.

Key words: thermal lens effect laser cavity dynamic stability output power

引 言

光泵 Nd:YAG 激光器的热效应会在 YAG 棒中引起轴向热伸长和径向折射率梯度, 从而产生激光介质的热透镜效应。这类激光器的输出功率密切依赖于热作用。一般情况下, 由于在泵浦的全部范围内会出现两个动态稳定区, 因而其输出功率曲线通常具有双峰结构, 这对于激光器的实际应用十分不利。有关热透镜谐振腔的研究已有许多报道^[1,2], 他们的研究都是以 $dw/df = 0$ (光斑半径对热焦距的微分) 为出发点的, 其共同特点是只适用于设计规定的热焦距值, 因而也是特定的输入、输出功率。而对于许多实际应用, 则希望激光器在输入功率允许的宽范围内, 其输出功率随泵浦功率的提高而稳定地增加。我们就是以此为出发点, 运用激光谐振腔的矩阵理论, 给出了内含热透镜效应平凹腔的 G 参数, 并根据 G 参数的表达式及谐振腔的稳定条件, 指出在某一特殊情形下, 谐振腔只存在单一的稳定区。通过选择适当的腔参数, 在宽泵浦功率范围内, 使激光器运行于有效动力学稳区内, 从而使其输出功率曲线几乎呈

现为一条直线。

1 理论分析

光泵下的 Nd: YAG 激光棒所具有的热透镜效应是一种厚透镜效应,如图 1 所示。其中 M_1 是平镜, M_2 为曲率半径 R 的凹镜, l 为激光棒的长度, h 表示热厚透镜的主平面 H_1 (或 H_2) 到棒的端面 S_1 (或 S_2) 之间的距离。其焦距 f 的倒数记为 x (屈光度) 和主平面位置 h 可表示为^[1]: $x = 4nl/b^2; h = l/2n$ (1)

式中, n 为棒的折射率, l 是棒长度, b 为热效应系数。对于通常的灯泵 Nd: YAG 激光器, 有一个更便于使用的经验公式: $x = 0.63P_{in}^\alpha$ (2)

式中, $\alpha = 1 \sim 1.15$, 视冷却条件取值, 在此取 α 为 1.15, P_{in} 是泵灯电功率, 单位为 kW, x 的单位为 m^{-1} 。

厚透镜的光学传输矩阵为^[3]: $M = \begin{pmatrix} 1 - hx & 2h \\ -x & 1 - hx \end{pmatrix}$ (3)

通常情况下, (3) 式可写为: $M = \begin{pmatrix} 1 & h \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -x & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & h \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ (4)

则图 1 所示的谐振腔内从 M_1 到 M_2 的单程传输矩阵 M' 为:

$M' = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & l_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & h \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -x & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & h \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ (5)

式中, $L_1 = l_1 + h, L_2 = l_2 + h$ 。由(5)式可得腔的 G 参数为^[4]:

$G_1 = A = 1 - L_2x, G_2 = D - B/R = 1 - L_1x - (L_1 + L_2 - L_1L_2x)/R = -L_1x(1 - L_2/R) + (R - L_1 - L_2)/R$ (6)

由于 x 随着泵浦功率的变化而变化, 激光腔的工作点在 G_1G_2 平面上将不再是一个固定点, 由(6)式消去 x 得:

$G_2 = L_1(1 - L_2/R)G_1/L_2 - L_1(1 - L_2/R)/L_2 + 1 - (L_1 + L_2)/R$ (7)

这就是说工作点将在 G_1G_2 平面上沿直线运动。我们知道, 激光腔的稳定条件为^[5]:

$0 < G_1G_2 < 1$ (8)

一般情况下直线和双曲线 $G_1G_2 = 1$ 及两个坐标轴有 4 个交点, 激光腔存在两个动力学稳定区, 如图 2 中的直线 a 的实线部分。但对于特殊情形 $L_2 = R$, 如图 2 中的 b, 此时:

$G_2 = -L_1/R$ (9)

工作点沿一条平行于 G_1 的水平线运动, 与双曲线及坐标轴只有两个交点, 即只存在一个稳定区。

由图 2 不能直接看出稳定区的宽度, 为了定量地反映出稳定区的宽度, 我们分析 G_1G_2 对 x 的依赖关系。由(6)式和(9)式得:

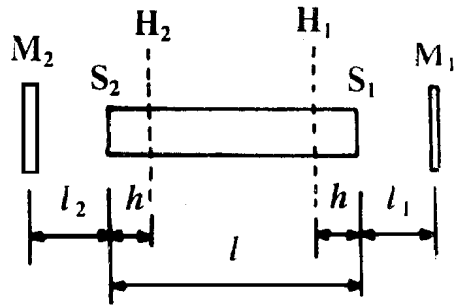


Fig. 1 Layout of the plane-concave cavity with an internal thermal lens

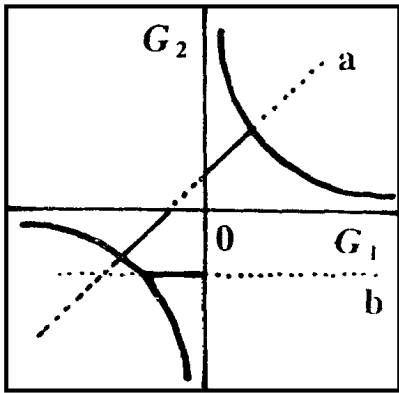


Fig. 2 Stability diagram in $G_1 G_2$ plane, the stability zones are evidenced by solid lines

$$G_1 G_2 = - \frac{L_1}{R} \cdot \frac{1-R}{X} = L_1 X - \frac{L_1}{R} \quad (10)$$

根据(10)式可获图3。由图中可看出固定的腔结构参数下稳定区的宽度,但不能反映稳定区的边界值与腔结构参数之间的关系,而我们设计激光器必须知道稳定区的边界值与腔结构参数之间的关系,故必须找出稳定区的边界值与全反镜曲率半径 R 和输出镜位置 L_1 之间的关系。

由 $G_1 G_2 = 0$ 及 $G_1 G_2 = 1$ 得:

$$X_1 = 1/R \quad (11)$$

$$X_2 = 1/R + 1/L_1 \quad (12)$$

显然(11)式对应于稳定区的低值边界,而(12)式对应于

高值边界。根据(11)式和(12)式可知,稳定区的低值边界取决于 R , 高值边界由 R 和 L_1 共同决定, 稳定区的宽度为 $X_2 - X_1 = 1/L_1$, 随着 L_1 的减小而增加, 它们的关系如图4所示。

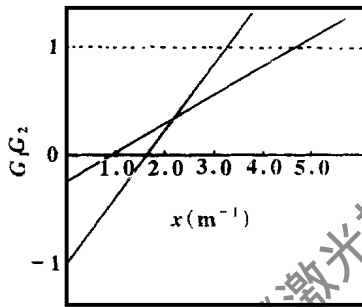


Fig. 3 $G_1 G_2$ as a function of X

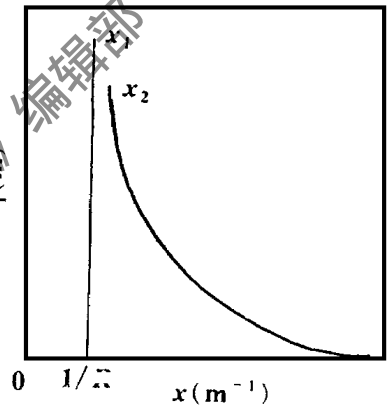


Fig. 4 Boundaries of the stability zones (sketch)

2 设计思路及实验

对于实际应用的激光器,希望在泵浦功率较宽范围内均能有效地振荡,所以,激光器必须运行在较宽的稳定区域内,这就要求 L_1 要小, R 要大。我们可近似认为在有效动力学稳区内由激光棒的有限孔径限制作用而引起的衍射损耗为零,但激光器必然存在输出耦合及激光棒的吸收、散射等引起的损耗,这些损耗决定了激光器的阈值。尽管在理论上当 L_1 取得足够小, R 足够大,激光器可在泵浦的全功率范围内有效振荡,但由于阈值的限制,激光器不可能在泵浦的全功率范围内振荡。激光腔在有效稳定区振荡时,此时阈值最小。本实验工作物质为 $i4\text{mm} \times 100\text{mm}$ 的 Nd YAG 棒,聚光腔为椭圆镀银聚光腔,电源为串联负反馈稳流电源,冷却条件采用一次水冷方式。实验测得有效振荡时的阈值为 1.2kW , 对应的屈光度为 0.78m^{-1} 。另外,实际激光器腔长受到限制, R ($R = L_2$) 不能太大,一般腔长为 1m 左右。谐振腔输出镜的失调灵敏度用输出镜的微小转角 α 所导致的光斑在两个腔镜上的位移 x 和 y 来表示:

$$l \begin{cases} x = -L_1 X \\ y = R\alpha \end{cases} \quad (13)$$

腔长和失调灵敏度的限制决定了 R 不能取得过大。 $L_1 = l_1 + l/2n$, l_1 可小到零, L_1 的最小值由棒长决定。另外,激光器只有运行在有效动力学稳区内,它的衍射损耗才能近似为零,而对于 $G_1 G_2$ 的值接近 0 或 1 的谐振腔仍有一定的衍射损耗。若 L_1 取得过小,由图3分

析可知, $G_1 G_2$ 的值在较宽的范围内接近 0 或 1, 泵浦灯为氩灯, 它所允许的最大工作功率为 4.9kW。对应的屈光度为 3.9m^{-1} , L_1 的取值只需要使高值边界大于 3.9m^{-1} 即可。

综合上述分析, 我们选取了二套腔参数: (1) $R = L_2 = 1\text{m}$, $L_1 = 0.25\text{m}$; (2) $R = L_2 = 0.7\text{m}$, $L_1 = 0.6\text{m}$, 进行对比实验, 实验中输出镜的透过率均为 15%。

测量泵灯电流、电压及输出功率 P_{out} 三个量, 泵浦功率 P_{in} 由其电流和电压之乘积算得。

实验结果如图 5 所示。由图 5 作如下分析: (1) 图 5

中的 b, 随着泵浦功率的提高, 激光器开始振荡, 输出功率先迅速上升一段, 之后又线性增加一段, 然后再迅速减小。这是因为按理论计算, b 的低值边界为 $1/0.7\text{m}^{-1}$, 对应的输入功率为 2.0kW, b 的高值边界为 $(1/0.7 + 1/0.6)\text{m}^{-1}$, 对应的输入功率为 4.0kW。当泵浦功率接近低值边界时, 尽管此时在非稳区, 但 $G_1 G_2$ 的值接近零, 是浅度非稳, 衍射损耗不大, 激光器开始振荡; 而在稳区边缘处, 尽管此时已在稳区内, 但未进入有效动力学稳区, 仍有衍射损耗存在, 且在低值边界附近一段范围内, 激光器由非稳区向稳区过渡, 衍射损耗随 P_{in} 的增加而减小, 故在该段中 P_{out} 随 P_{in} 不是线性增加, 而是迅速上升; 随着 P_{in} 继续增加, 进入有效稳定区, 衍射损耗接近于零, 激光器的总损耗接近为常量, 故 P_{out} 与 P_{in} 呈线性关系; P_{in} 再继续增加, 激光器由稳区向另一非稳区过渡, P_{out} 迅速减小。

(2) 图 5 中的 a 除开始一小段 P_{out} 不为线性增加, 其余在整个泵浦功率范围内 P_{out} 与 P_{in} 均呈良好的线性关系。这是因为 a 的低值边界为 1m^{-1} , 对应的输入功率为 1.5kW, 高值边界为 5m^{-1} , 对应的输入功率为 6.1kW, 因而随着 P_{in} 的增加, 除开始的一小段外, 在 P_{in} 允许的全部范围内, 激光器均工作于有效动力学稳区内, 故 P_{out} 与 P_{in} 呈线性关系。

(3) b 的线性部分与 a 的线性部分在实验误差范围内重合。这是因为当 a, b 均处于有效动力学稳区内时, 其衍射损耗都近似为零, 其它损耗相同, 对应于相同的 P_{in} 应该有相同的 P_{out} 。实验结果表明, a 的有效动力学稳区宽于 b, 故 a 比 b 更具实际意义。

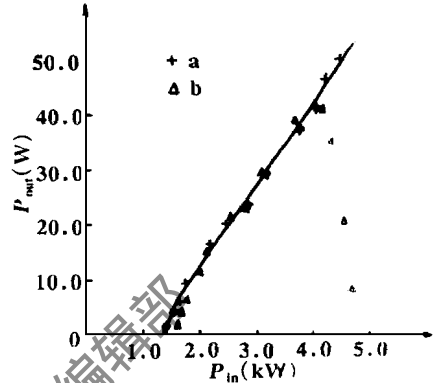


Fig. 5 Input-output diagram

a— $R = L_2 = 1.0\text{m}$, $L_1 = 0.25\text{m}$ b— $R = L_2 = 0.7\text{m}$, $L_1 = 0.6\text{m}$

3 结 论

Nd: YAG 激光器应用非常广泛。在实际应用中, 希望激光器在泵浦功率的宽范围内均能有效运行, 即输出功率随输入功率稳定增加。本工作结果对此很有参考价值。

参 考 文 献

- 1 李世忱. 物理学报, 1989; 38(4): 569
- 2 De Silvestri S. Opt Commun, 1986; 57(5): 339
- 3 韦伯 H. 激光谐振腔. 武汉: 华中工学院出版社, 1983: 36
- 4 魏光辉, 朱宝亮. 激光束光学. 北京: 北京工业学院出版社, 1987: 240
- 5 伍长征. 激光物理. 上海: 复旦大学出版社, 1988: 85

*

*

*

作者简介: 王建, 男, 1965年10月出生。工程师, 硕士。从事激光及其应用方面的科研工作。