

激光热稳定腔的分析与设计

金德运 黄国松

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

提 要

基于激光腔本征方程,分析了稳定腔的动态特性,提出热稳定腔的设计方法,给出满意的实验结果。

激活介质光泵感应热畸变效应不仅扩大输出光束发散角,而且使输出稳定性变差。此外,腔的结构也影响光亮度及其稳定性。因此,对于确定增益的介质,合理设计谐振腔满足实际应用对光束质量的要求,无疑是十分重要的。J. Steffon 等人给出热不灵敏腔的设计^[1],对于介质热效应不很严重的低重复率固体激光器是比较方便的。但是,应用于高重复率或连续固体器件却遇到了困难。

本文从激光腔本征方程出发,分析激光腔的动态特性,得到激光腔动态方程、热稳定方程和亮度方程,讨论腔的合理设计,给出满意的实验结果。

—

振荡光束在腔内往返一次后满足自洽条件。在近轴近似下,它表征了激光腔对光束的线性变换^[2]。此线性变换是以激光腔往返矩阵 $\mathcal{A}_{往返}$ 来表示。因此,激光腔本征光矢 $\begin{pmatrix} r \\ r' \end{pmatrix}$ 满足本征方程:

$$\mathcal{A}_{往返} \begin{pmatrix} r \\ r' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r \\ r' \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} r \\ r' \end{pmatrix}, \quad (1)$$

式中 r 、 r' 分别为本征光束离开腔轴的位移与斜率。 A 、 B 、 C 、 D 为 $\mathcal{A}_{往返}$ 的矩阵元。设 $g = (A+D)/2$, 可以得到稳定腔 ($|g| < 1$) 的本征值 M 、本征光矢 $\begin{pmatrix} r \\ r' \end{pmatrix}$ 分别为:

$$M_{p,n} = g \pm i\sqrt{1-g^2}, \quad (2)$$

$$\begin{pmatrix} r \\ r' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r \\ r/R_{p,n} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

其中 $R_{p,n}$ 由下式确定^[2]:

$$\frac{1}{R_{p,n}} = \frac{M_{p,n} - A}{B} = \frac{1}{R_1} \pm i \frac{\alpha_1}{W_1}, \quad (4)$$

式中脚标 p 、 n 分别对应于(2)式中根号前的正负号。 R_1 为输出腔镜的曲率半径。 α_1 、 W_1 分别为基模光束输出发散角和光斑半径^[3]。

(2)~(4)式给出的结果表明:稳定腔的本征光矢为复矢量。对于确定位移 r , 只有斜率为 $r/R_{p,n}$ 的那些光线, 才是腔的本征解。因为 $R_{p,n}=r/r'$, 故称 $R_{p,n}$ 为本征波面曲率半径。它是由矩阵元 A 、 B 、 C 、 D 所唯一确定。本征值 M_p 、 M_n 及本征波面曲率 R_p^{-1} 、 R_n^{-1} 互为共轭复数。(4)式赋予 $R_{p,n}$ 的物理意义是十分明确的: 实部 $\text{Re}(R_{p,n}^{-1})$ 表征输出光束的波面曲率, 即输出腔镜曲率。虚部 $\text{Im}(R_{p,n}^{-1})$ 表征输出束散角 α_1 与光斑半径 W_1 的比值, 即输出的激光亮度。因此, 本征波面曲率半径 $R_{p,n}$ 是表征激光振荡特性的特征参量。本征值 $M_{p,n}$ 反映振荡光束在腔内一个往返后, 本征光矢位移 r 与斜率 r' 所经历的变化。注意到 $M_{p,n}=1$, 可见光束经历一个往返周期后, r 与 r' 的绝对值是不变的, 故为驻波。衍射理论分析表明^[4]: 稳定腔的光场为高斯分布。因此, 改称稳定腔为高斯驻波腔, 具有更确切、清晰的物理意义。

二

在重复率光泵下, 激活介质具有平方律型的折射率分布, 通常称之为类透镜介质。对内腔含有这种介质的谐振腔, 往返矩阵 $\mathcal{A}_{\text{腔}}$ 可以具体表示为^[2]:

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 4G_1G_2 - 2A_0G_2 - 1 & 2B_0G_2 \\ \frac{2A_0}{B_0} \left(2G_1G_2 - A_0G_2 - \frac{G_1}{A_0} \right) & 2A_0G_2 - 1 \end{pmatrix}, \quad (5)$$

式中 $G_1 = A_0 - B_0/R_1$, $G_2 = D_0 - B_0/R_2$, $A_0 = 1 - b/f_T$, $B_0 = a + b - ab/f_T$, $D_0 = 1 - a/f_T$ 。其中 a 、 b 为输出腔镜、全反射腔镜至激活介质“主平石”间的距离, R_2 为全反射镜的曲率半径, f_T 为介质相应于一定泵浦功率下的热焦距。

在激光器实际运转中, 光泵波动与介质热效应的扰动导致热焦距 f_T 的起伏是难以避免的。为此, 以热焦度 f_T^{-1} 作为腔的扰动变量, 得到激光腔的动态方程为^[3]:

$$G_2 = \eta G_1 + B_2, \quad (6)$$

式中 $\eta = a(1 - b/R_2)/b(1 - a/R_1)$, $B_2 = 1 - (a + b)/R_2 - \eta(1 - (a + b)/R_1)$ 。 η 、 B_2 为直线(6)的斜率与截距。

激光腔输出稳定性取决于 $R_{p,n}$ 对 f_T 的扰动是否不灵敏。由 $dR_{p,n}/df_T = 0$, 得到激光腔的热稳定方程为^[3]:

$$G_1G_2 = 1/2 - \eta G_1/G_2. \quad (7)$$

(7)式结果表明: 当 $\eta \rightarrow 0$ 时, $G_1G_2 = 1/2$, 这就是文献 [1] 给出的热不灵条件。但通常情况下, $\eta = 0$ 是难以满足的, 所以热稳定条件(7)要求 G_1G_2 取值与腔结构有关, 甚至可以偏离 $1/2$ 很远。

激光腔输出亮度取决于 $\text{Im}(R_{p,n}^{-1})$ 的大小。为此, 定义激光腔亮度参数 NS_1 为:

$$NS_1 = 1/B_0 \text{Im}(R_{p,n}^{-1}) = G_2/\sqrt{G_1G_2(1 - G_1G_2)}. \quad (8)$$

显然, NS_1 值越大, $\text{Im}(R_{p,n}^{-1})$ 越小, 相应输出束散角越小。 NS_1 值由腔的 G 因子所唯一确定, 与其它参数无关。它等于腔的等效菲涅尔数 N 与归一化输出光斑面积 S_1 的乘积^[3]。当 $G_1G_2 \rightarrow 0$ 或 $G_1G_2 \rightarrow 1$, 相应 $NS_1 \rightarrow \infty$, 表明临界腔具有极大的衍射损耗。凡是 G_2 值大的激光腔, 具有相应高的激光亮度。

激光腔亮度方程(8)、动态方程(6)与热稳定方程(7)分别表征输出激光亮度的高低、随 f_T 的动态变化及其对 f_T 扰动的不灵敏条件。反映在动态稳定图上,可以得到激光腔亮度曲线、“运动”轨迹与热稳曲线^[3]。它们描述了激光腔的动态振荡特性。

三

综合上述,可以看到:激光腔输出的热稳定性与直线(6)在稳定图上的斜率 η 与截距 B_2 关系极大。图1给出直线(6)在稳定图上的不同部位与取向,具有相应不同的热稳定性的定性分析。当 $B_2 > 0, \eta > 0$ 时,正支腔“运动”轨迹与 $G_1 = 0$ 轴、 $G_1 G_2 = 1$ 曲线相交,与交点相应的 $\alpha_1 \rightarrow$ 衍射极限(见(8)式),故存在热稳极值点,如 P_1 点所示。负支腔的“运动”轨迹相交于 $G_2 = 0$ 轴与 $G_1 G_2 = 1$ 曲线,与 $G_2 = 0$ 相应的 α_1 值取有限值,故不存在热稳腔结构。同理,对于 $B_2 < 0, \eta > 0$,仅有负支腔存在热稳极值点,如 P_2 所示。

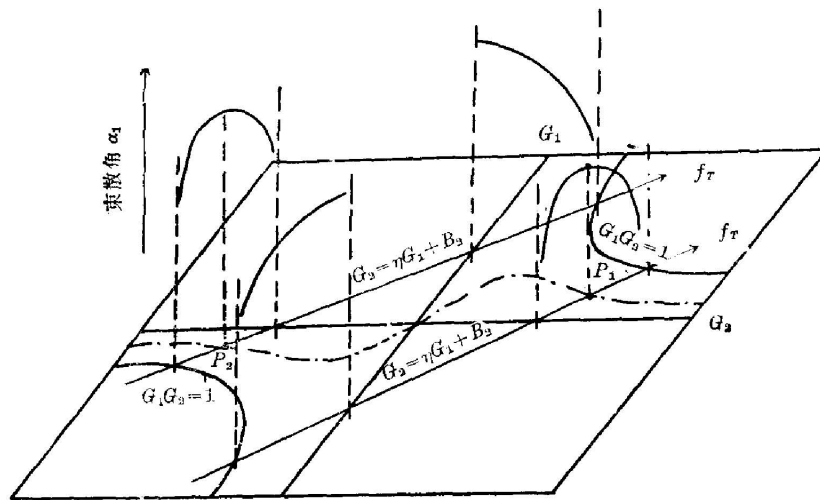


图1 激光腔动态振荡特性

Fig. 1 Dynamic characteristic of the laser resonators

设计满足实际要求的热稳定高亮度腔,基本思想就是选择满足热稳条件(7)与具有 NS_1 值大的腔结构:

1. 根据给定的 f_T 与腔几何长度 L , 适当选取 NS_1 、 η 作腔的设计参数;
2. 设 $\delta = 4\eta/NS_1 < 1$, 热稳腔为方程(7)、(8)的通解: $G_1 = \pm(1-\delta)/NS_1$, $G_2 = \pm NS_1/2$ 。式中正负号分别对应正、负支激光腔;
3. 热稳腔结构参数 a 、 b 、 R_1 、 R_2 为下列方程的通解:

$$\begin{cases} 1 - B_0/R_1 - b/f_T = G_1, \\ 1 - B_0/R_2 - a/f_T = G_2, \\ a(1 - b/R_2) = \eta b(1 - a/R_1), \\ a + b = L - d(1 - 1/n), \end{cases}$$

式中 n 、 d 为激光棒的折射率与长度。对于常用激光腔,文献[3]给出方便的设计公式。

4. 根据设计结果,可以定量计算激光腔输出特性:

基模光斑半径

$$W_1 = K / \sqrt{\ln(R_{p,n}^{-1})}, \quad (9)$$

基模束散角

$$\alpha_1 = K \cdot \sqrt{\ln(R_{p,n}^{-1})}, \quad (10)$$

多模束散角

$$\alpha_m = \phi B_0 \ln(R_{p,n}^{-1}) / 2b\sqrt{Z}, \quad (11)$$

式中 $K = \sqrt{\lambda/\pi}$, $Z = 1 + 2yG_1 + y_2G_1/G_2$ 。其中 λ 为激光波长, $y = a/b$, ϕ 为激光棒直径或内腔光阑直径。

设计结果如不满足要求, 可适当修改设计参数直到获得满意结果为止。

四

实验使用一台连续 YAG 激光器。YAG 棒尺寸为 $\phi 5 \text{ mm} \times 90 \text{ mm}$ 。聚光腔为双氙灯泵浦的双椭圆腔。设计得到的结果为: $a = 14.5 \text{ cm}$, $b = 30 \text{ cm}$, $R_1 = \infty$, $R_2 = -30 \text{ cm}$ 。输出耦合为 $T = 11\%$ 。内腔光阑直径为 $\phi 1.5 \text{ mm}$ 。实验测量结果表明: 泵浦功率 7.5 kW 时, 相应 $f_T = 42 \text{ cm}$ 。单模输出大于 12 W 。束散角 $\alpha_1 = 0.5 \text{ mrad}$ 。热稳定性优于 $6 \times 10^{-6} \text{ mrad/W}$ 。

表 1 热稳腔动态分析结果

Table 1 Dynamic analysis of the thermo-stable resonators

$f_T(\text{cm})$	$Q(\%)$	$Z_1(\text{cm})$	$\alpha_1(\text{mr})$	$\alpha_m(\text{mr})$
32	8.31751	30.4603	.45425	1.57506
34	6.34568	30.6195	.506943	2.01243
36	5.60294	30.4855	.527669	2.22923
38	5.26119	30.0611	.53406	2.32835
40	5.11896	29.3438	.532212	2.35231
42	5.10417	28.3252	.524899	2.32334
44	5.18894	26.9907	.513513	2.2543
46	5.36696	25.3185	.498731	2.15279
48	5.64784	23.2788	.480766	2.02298
50	6.05993	20.8317	.459432	1.86632

注: Q = 基模体积/YAG 体积; Z_1 : 最小光腰离输出镜的距离;
 α_1 : 基模束散角; α_m : 多模束散角。

应用(8)~(11)式, 理论上计算了输出的动态特

性如表 1 所示。图 2 给出归一化基模体积随 f_T 的变化。结果表明, 实验结果与理论预计是基本一致的。然而, 模体积、基模束散角与多模束散角的热稳定性并不严格一致。(9)~(10)式结果表明: $\ln(R_{p,n}^{-1})$ 值唯一确定了基模束散角。多模束散角 $\alpha_m^{(1)}$ 与 ϕ 、 B_0 、 $\ln(R_{p,n}^{-1})$ 成正比, 与后腔长 b 成反比。因此, 采取介质热效应补偿措施、内腔光阑限模与拉长后腔长 b , 可以相应提高输出光亮度。但是, 激光腔的高亮度与热稳定性, 两者是互相矛盾, 互相制约的。合理设计, 应是适当兼顾, 折衷选择。

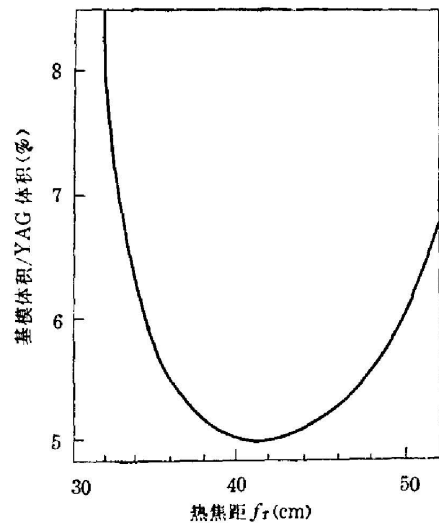


图 2 热稳腔基模体积随 f_T 变化曲线

Fig. 2 Curve of the fundamental-mode volume vs f_T for thermo-stable resonators

参 考 文 献

- [1] J. Steffen; *Optical and Quant. Elect.*, 1975, No. 7, 505.
[2] 金德运等;《中国激光》, 1984, 11, No. 3 (Mar), 159.
[3] 金德运;《应用激光》, 1982, 2, No. 5, 33.
[4] H. Kogelnik; *B. S. T. J.*, 1965, No. 44, 455
[5] J. Steffou *et al.*; *IEEE J. Quant. Elect.*, 1972, QE-8, 239.

Analysis and design of the thermo-stable resonators

JIN DEYUN AND HUANG GUOSONG

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

(Received 19 March 1984; revised 13 June 1984)

Abstract

On the basis of the laser resonator intrinsic equation, the dynamic characteristic of the stable resonators has been analysed and method for designing the thermo-stable resonators has been proposed. The experimental results obtained are in agreement with the theoretical analysis.

首届全国量子光学学术讨论会

由中国科技大学主办的首届全国量子光学学术讨论会于1984年8月22日至25日在安徽滁州市召开。来自全国各地33所高等院校和研究所的58位代表出席了会议。

会议共收到论文29篇,宣读的论文25篇,内容涉及了量子光学中一些理论、方法、现象、规律和实验等。一些多方面重视的新课题,例如:相干态、压缩态、双光子过程、超辐射、超荧光以及其它瞬态相干光过程。光子双稳态、孤立波、反聚束效应、光和物质相互作用的量子理论等,在会上进行了充分的探讨。值得特别指出的是代表们对与光子双稳态器件技术性能有关的论文及相干度测量的实验研究报告特别感兴趣,进行了热烈的讨论,各抒己见,并对其潜在应用作了估计。总的来说,会议的气氛是热烈的和活跃的。

会议还就量子光学学科的研究现况与今后的活动、发展等作了专门讨论,与会代表共同认为量子光学主要研究光的相干及统计性质及光与物质相互作用的量子特性等的基础学科,它是一门理论与实践密切结合的学科。当前这一领域推动了不少新的现象、效应与技术的发展,并在进一步应用中存在着广泛的前途。全体代表一致认为,这次会议开得很成功的,会议反映出我国在这一领域许多方面,特别是一些新课题方面具备了一定的研究能力与水平。会议提出了一些新的具有特点和价值的工作。

(徐志加)