

激光棒位置对热不灵敏腔运行特性的影响

陈慧敏,李家泽

(北京理工大学 光电工程系,北京 100081)

摘要:对于给定的腔型,为获得最大的稳定激光输出,必须选择最佳的激光棒位置。运用激光谐振腔的矩阵理论,给出了内含热透镜的三种腔型下的 g 参数以及棒位置对运行特性的影响,使用 Matlab 软件分别进行了理论模拟,在泵浦电压 1000 V、重频 10 Hz、晶体对称置于腔中间的条件,通过实验验证了部分理论结论,对谐振腔的设计具有一定的指导作用。

关键词:热不灵敏腔; 热透镜效应; 激光棒位置

中图分类号: TN248; TN243 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2005)02-0142-04

Influence of laser rod position on the thermal insensitive resonators

CHEN Hui-min, LI Jia-ze

(Department of Optical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: For a certain resonator, it is necessary to find out the optimum position of the laser rod to achieve maximum output power. By using the matrix theory, effect of g -parameters for different laser cavity and different laser rod position on the operation of a thermal insensitive solid state laser resonator is presented. In the condition as 1000 V pump voltage at 10 Hz repetition frequency with the crystal in the middle of the resonator, the experimental results seem quite similar with theoretical prediction by using matlab software. The conclusions are of benefit to the design of resonator.

Key words: Thermal insensitive resonator; Thermal lensing effect; Laser rod position

0 引言

在谐振腔的设计中,特别对于大功率激光器,热透镜的影响一直是一个不容忽视的问题。激光棒的灵敏度因子说明激光棒的光焦度 D 随着输入功率变化。国外提出了热不灵敏腔的概念^[1,2],其中激光棒位置对激光器运转特性的影响很大。国内也有相关方面的研究。陈同生等^[3]通过实验验证了棒的位置对 Nd:YAG 锁模激光器的影响。翟华金等^[4]对商用典型凹凸

腔进行了模拟。徐荣青等^[5]对平平腔进行了模拟,但二者所用的激光器均为 Nd:YAG。本文在理论分析的基础上,模拟了平平腔、平凸腔、平凹腔的特性,其结果对谐振腔的设计具有重要的参考价值。

1 基本理论

Cr、Tm、Ho:YAG 棒的热透镜效应等效为一个热焦距 f 的厚透镜,热焦距 f 与泵浦功率成反比。图 1 为球面谐振腔的结构示意图, M_1 、 M_2 为谐振腔两反射镜

面,其曲率半径分别为 R_1, R_2 , 两反射镜面到棒两端面的距离分别为 d_1, d_2 , 晶体棒长度为 l 。 H_1, H_2 为厚透镜的两个主面, 其到棒端面的距离为 h , 由厚透镜主面公式可知, $h=l/2n$, n 为棒的折射率, 厚透镜主面到谐振腔两反射镜的距离分别为 $L_1=d_1+h, L_2=d_2+h$ 。 光焦度 $D=l/f$ 。

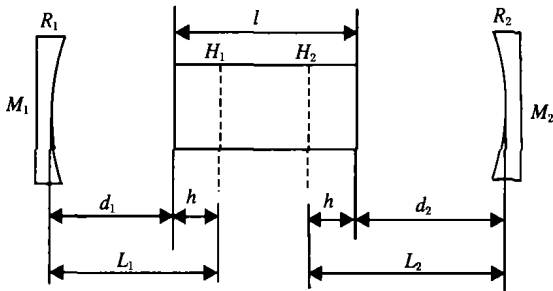


图 1 球面谐振腔的结构示意图

Fig.1 Scheme of spherical cavity

从 M_1 到 M_2 腔内介质的单程传输矩阵为:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{M} &= \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} = \\
 & \begin{bmatrix} 1 & L_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \\
 & \begin{bmatrix} 1 - \frac{L_2}{f} & L_1 + L_2 - \frac{L_1 L_2}{f} \\ -\frac{1}{f} & 1 - \frac{L_1}{f} \end{bmatrix} \quad (1)
 \end{aligned}$$

则球面谐振腔的 g^* 参数为^[6]:

$$g_1^* = a - \frac{b}{R_1} = 1 - \frac{L_2}{f} - \frac{L_1 + L_2}{R_1} + \frac{L_1 L_2}{f R_1} \quad (2)$$

$$g_2^* = d - \frac{b}{R_2} = 1 - \frac{L_1}{f} - \frac{L_1 + L_2}{R_2} + \frac{L_1 L_2}{f R_2} \quad (3)$$

$$L^* = L_1 + L_2 - \frac{L_1 L_2}{f} \quad (4)$$

根据 Magni^[2]引入的辅助性参数:

$$u_1 = L_1 \left(1 - \frac{L_1}{R_1} \right) \quad (5)$$

$$u_2 = L_2 \left(1 - \frac{L_2}{R_2} \right) \quad (6)$$

$$x = \frac{1}{f} - \frac{1}{L_1} - \frac{1}{L_2} \quad (7)$$

公式(2)~(4)可简化为:

$$g_1^* = -\frac{L_2}{L_1} (1 + x u_1) \quad (8)$$

$$g_2^* = -\frac{L_1}{L_2} (1 + x u_2) \quad (9)$$

$$L^* = -L_1 L_2 x \quad (10)$$

由于热透镜等效于焦距随泵浦功率而变化的动态薄透镜, 故随着泵浦功率的变化, 激光腔的工作点将在 $g_1^* - g_2^*$ 平面上沿直线运动, 由此决定了含热透镜激光腔理论上将存在两个稳定工作区。

利用高斯光束传输定理可得激光棒主面上光斑半径 ω_3 的表达式:

$$\omega_3^2 = \frac{\lambda}{\pi} \frac{|2x u_1 u_2 + u_1 + u_2|}{[g_1^* g_2^* (1 - g_1^* g_2^*)]^{\frac{1}{2}}} \quad (11)$$

相应束腰宽度 ω_{30} 表达式为:

$$\omega_{30}^2 = \left(\frac{2\lambda}{\pi} \right) \max(|u_1|, |u_2|) \quad (12)$$

式中 L_2 为激光棒主面到输出镜 M_2 的距离。由热透镜主面光斑半径 ω_3 的极值条件:

$$\frac{d\omega_3}{d\left(\frac{1}{f}\right)} = \frac{d\omega_3}{dx} = 0 \quad (13)$$

可得到热不灵敏条件:

$$g_1^* g_2^* = \begin{cases} \frac{1}{2} \left(1 - \frac{u_2}{u_1} \right), & |u_1| > |u_2| \\ \frac{1}{2} \left(1 - \frac{u_1}{u_2} \right), & |u_2| > |u_1| \end{cases} \quad (14)$$

记上式右端为 p , 则热不灵敏工作点 $(1/f)_0$ 作为 L_2 的函数表达式为:

$$\left(\frac{1}{f}\right)_0 = \frac{-(u_1 + u_2) \pm \sqrt{(u_1 + u_2)^2 - 4u_1 u_2 (1-p)}}{2u_1 u_2} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L - L_2} \quad (15)$$

腔镜 M_1, M_2 上的束宽分别为 ω_1, ω_2 , 相应束腰宽

度为 ω_{10}, ω_{20} :

$$\omega_{10}^2 = \frac{\lambda |L_0^*|}{\pi} \left\{ \frac{g_{20}^*}{g_{10}^* [1 - (g_1^* g_2^*)_0]} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (16)$$

$$\omega_{20}^2 = \frac{\lambda |L_0^*|}{\pi} \left\{ \frac{g_{10}^*}{g_{20}^* [1 - (g_1^* g_2^*)_0]} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (17)$$

2 数值计算及讨论

利用公式(12)、(14)~(17)分别选用平平腔、平凹腔和平凸腔进行理论模拟,其中 $L=L_1+L_2=260$ mm, $\lambda=2.1$ μm , 晶体长 100 mm, 平平腔 $R_1=R_2=\infty$, 图 2 为热不灵敏点随 L_2 的变化规律, 图 3 为 $(g_1^* g_2^*)_0$ 随 L_2 的变化关系, 图 4 为 $\omega_{10}, \omega_{20}, \omega_{30}$ 随 L_2 的变化关系。平平腔的变化关系与参考文献[5]类似。

对于平凹腔, $R_1=R, R_2=\infty$, 其中 $R=1$ m, $R=2$ m, $R=3$ m。图 5 为热不灵敏点随 L_2 的变化规律, 图 6 为 $(g_1^* g_2^*)_0$ 随 L_2 的变化关系, 图 7 为 ω_{30} 随 L_2 的变化关系。

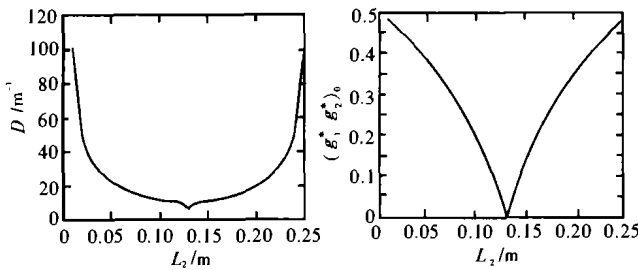


图 2 热稳定点 D 随 L_2 的变化关系
Fig.2 Thermal insensitive points D as a function of L_2

图 3 $(g_1^* g_2^*)_0$ 随 L_2 的变化关系
Fig.3 $(g_1^* g_2^*)_0$ as a function of L_2

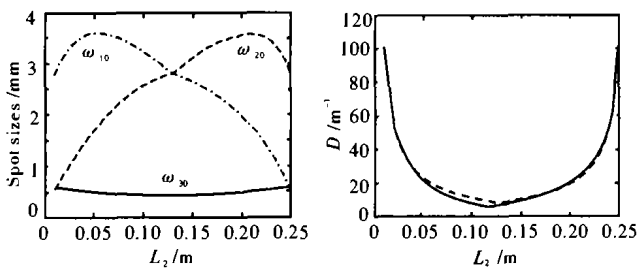


图 4 $\omega_{10}, \omega_{20}, \omega_{30}$ 随 L_2 的变化关系
Fig.4 Spot sizes $\omega_{10}, \omega_{20}, \omega_{30}$ as a function of L_2

图 5 热稳定点 D 随 L_2 的变化关系
Fig.5 Thermal insensitive points D as a function of L_2

对于平凸腔, $R_1=R, R_2=\infty$, 其中 $R=-1$ m, $R=-2$ m, $R=-3$ m。图 8 为热不灵敏点随 L_2 的变化规律, 图 9 为 $(g_1^* g_2^*)_0$ 随 L_2 的变化关系, 图 10 为 ω_{30} 随 L_2 的变化关系。

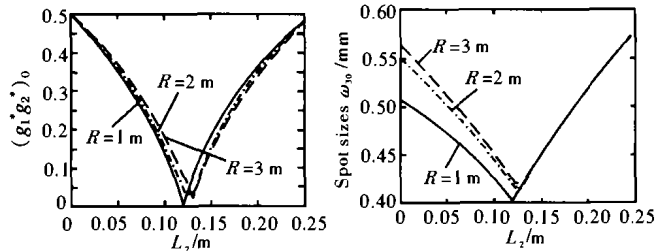


图 6 $(g_1^* g_2^*)_0$ 随 L_2 的变化关系
图 7 ω_{30} 随 L_2 的变化关系
Fig.6 $(g_1^* g_2^*)_0$ as a function of L_2 Fig.7 ω_{30} as a function of L_2

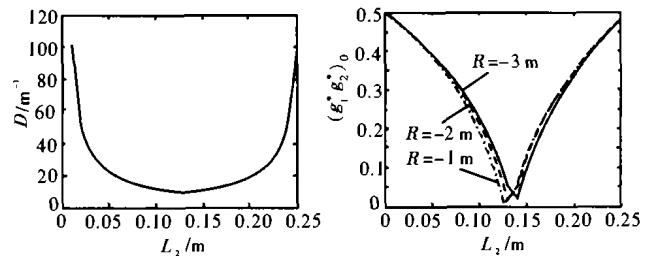


图 8 热稳定点 D 随 L_2 的变化关系
图 9 $(g_1^* g_2^*)_0$ 随 L_2 的变化关系
Fig.8 Thermal insensitive points D as a function of L_2 Fig.9 $(g_1^* g_2^*)_0$ as a function of L_2

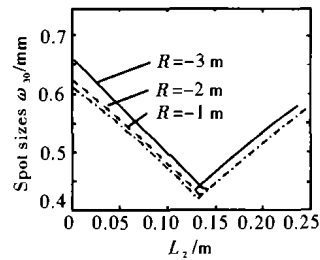


图 10 ω_{30} 随 L_2 的变化关系
Fig.10 ω_{30} as a function of L_2

实验采用聚四氟乙烯腔, 腔长 260 mm, 冷却水水泵扬程 7 m, 激光电源的电容 200 μF , Cr、Tm、Ho: YAG 晶体为 $\phi 4 \times 100$ mm, 输出镜为 $T=10\%$ 的平面镜, 全反镜分别为平面镜、凹面镜和凸面镜三种, 其中后两种分别给定不同的曲率半径。在水温 10 $^\circ\text{C}$, 泵浦电压 1000 V, 重频 10 Hz 时测定激光的输出平均功率。其中晶体对称放于腔中间。表 1 为 D 取最小值时相应的参数值。

表 1 不同腔型下的参数值
Tab.1 Parameters of different cavities

Cavity	Totally reflecting mirror R/m	$L_2 /$ m	$D /$ m ⁻¹	$\omega_{10} /$ mm	$\omega_{20} /$ mm	$\omega_{30} /$ mm	Output power/W
Plane-plane cavity	∞	0.13	7.69	2.82	2.82	0.42	7.2
	1	0.12	7.50	2.88	2.93	0.43	8.0
Plane-concave cavity	2	0.13	8.88	2.87	2.85	0.42	7.3
	3	0.13	8.69	2.86	2.81	0.42	7.4
	-1	0.13	8.95	2.78	2.95	0.44	5.8
Plane-convex cavity	-2	0.13	9.25	2.80	2.89	0.43	7.2
	-3	0.14	9.23	2.96	2.80	0.44	7.1

3 结 论

对于给定的腔型,为获得最大的稳定激光输出,必须选择最佳的激光棒位置。如果增大泵浦功率,必

须适当改变激光棒的位置,使激光腔在新的泵浦条件下仍能工作于热不灵敏状态。本文给出的输出平均功率值是在泵浦电压 1000 V,重频 10 Hz 时,晶体对称放置于腔中间的结果。所给出的理论变化趋势对谐振腔的设计有一定的指导作用。

参 考 文 献:

- [1] Walter Koechner;孙文,江译文,程国祥.固体激光工程[M].北京:科学出版社,2002.
- [2] Vittorio Magni. Resonators for solid-state lasers with large-volume fundamental mode and high alignment stability[J].Applied Optics, 1986,25(1):107-117.
- [3] 陈同生,蓝信钜,刘耀蓝.棒和调制器的位置对 Nd:YAG 锁模激光器的影响[J].激光技术,1996,20(1):34-36.
- [4] 翟华金,李宝其,陈聪,等.激光棒位置对热不灵敏凹凸腔运转特性的影响[J].光学学报,1994,14(10):1026-1030.
- [5] 徐荣青,刘以安,王建,等.高输出功率的热稳谐振腔的设计[J].华东船舶工业学院学报,1999,13(4):29-32.
- [6] 吕百达.固体激光器件[M].北京:北京邮电大学出版社,2002.

(上接第 135 页)

4 前景展望

随着激光威胁的日趋复杂,激光告警系统中的传感器将向以下几个方面发展:

(1) 研制响应波段更宽的激光传感器,来适应未来战场的需要。

(2) 与其他种类的警戒装置(如雷达、红外、毫米波、紫外)相结合,构成全波段、一体化的传感器告警设备。

(3) 在单个传感器小型化和模块化的基础上,向深层集成的方向发展,即不同功能的传感器共用孔径和传输通道,甚至会出现共用功能单元的趋势。

(4) 将采用高级的多传感器数据融合技术,获得有关威胁目标的精确位置、属性估计以及对战场态势和威胁等级进行适时而完整的评价。

(5) 虚拟传感器融合技术将会有长足的发展。

通过运用新型敏感材料,提高传感器灵敏度;选

择合适材料滤除杂波干扰,提高传感器抗干扰能力。可以预计,随着激光告警系统向模块化和组件化方向发展,传感器技术将会不断完善,不断发展,最终将进入一个崭新的境界。

参 考 文 献:

- [1] 施德恒.机载激光告警系统述评[J].光机电信息,2001,18(9):19-24.
- [2] 付伟.机载激光告警器与机载自卫系统[J].光与控制,1997,(1):50-55.
- [3] 付伟.光纤前端的激光告警系统[J].红外与激光技术,1995,24(2):17-23.
- [4] 付伟.星载激光告警技术[J].应用光学,2002,23(4):21-25.
- [5] 刘中杰.战场多传感器数据融合技术综述[J].电光系统,1997,(2):30-34.