

# 衍射损耗耦合型高功率 Nd:YAG 激光器

钱列加

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

**摘 要** 本文提出并设计了适用于高功率固体激光器的新型谐振腔. 使用腔内衍射滤波器以实现激光束高的光束质量, 其衍射损耗作为耦合输出. 实验上, 获得了近衍射极限的 100 W 量级激光输出.

**关键词** 热透镜, 失调敏感度.

## 1 引 言

高功率(连续或高重复率)棒状固体激光器中, 存在着严重的热致双折射和热透镜问题<sup>[1,2]</sup>. 固体激光棒的等效热透镜焦距与闪光灯泵浦功率成反比, 在高功率泵浦(10 kW 量级)时, 其焦距可短至数十厘米<sup>[3]</sup>. 而更严重的问题在于, 具有热效应的固体棒并非通常所熟悉的高斯光学元件, 受热致双折射及泵浦和冷却不均匀(时间及空间上)等的影响, 不能简单地把它等效成一个理想透镜<sup>[1]</sup>, 光束会在其横截面的径向和切向存在不同的热焦距, 对 Nd:YAG 棒会有约 20 % 的差异<sup>[4]</sup>. 因此, 实际上棒状晶体在高功率运转状态下, 它是一个具有一定焦距涨落( $\bar{F}$ ,  $\Delta F$ )的热透镜. 如采用稳定腔结构, 棒内最大基横模光斑  $W$  为:  $W^2 = 2\lambda/\pi |A(1/F)|$ <sup>[5]</sup>. 受热透镜焦距涨落的影响, 在高功率泵浦时, 不可能获得大基模体积振荡, 从而影响最大输出功率. 对 Nd:YLF 激光器的热效应较弱<sup>[2]</sup>, 已有获得连续 40 W 的激光输出报道<sup>[6]</sup>. 但对 Nd:YAG 激光器, 其热效应较 Nd:YLF 晶体高一个量级以上, 在高泵浦功率时, 稳定腔结构不是获得高功率 TEM<sub>00</sub> 模激光输出的理想途径. 为获得大的模体积振荡, 原理上可采用非稳腔. 在几何光学近似下, 其基模损耗为  $1 - (1/M^2)$  (其中  $M$  是谐振腔的几何放大率), 腔模鉴别力为  $M^2$ <sup>[7]</sup>. 对增益不太高的固体激光器很难做到既有足够的腔模鉴别力又有较好的耦合而获得高功率.

本文提出一种新的谐振腔结构, 其根本在于腔内使用衍射滤波器(光栏或等效于光栏的衍射元件). 不管谐振腔的几何特征是属于稳定腔还是非稳腔结构, 此时, 谐振腔内的激光束特征则由衍射行为所决定, 任何光束在腔内不再是有限的(Confined), 它经腔内往返一周, 光束大小因衍射而远大于起始尺寸如图 1 所示, 经小孔衍射后又再继续下一个循环. 所以, 这样由衍射特征决定的谐振腔其本质上等效于非稳腔结构, 只不过此时谐振腔的等效几何放大

率  $M$  主要由腔内衍射元件所决定, 更准确地讲是由菲涅尔数  $FN$  决定. 使用只在中央部分才具有高反射的圆斑镜(Dot Mirror)作为衍射元件, 可以把这样的衍射损耗作为耦合输出. 因此称之为衍射损耗型谐振腔. 如在腔内适当的地方设置棒, 选取合适的  $FN$ , 谐振腔会选择较低衍射损耗的基模振荡, 而又具有大的模体积从而获得高功率.

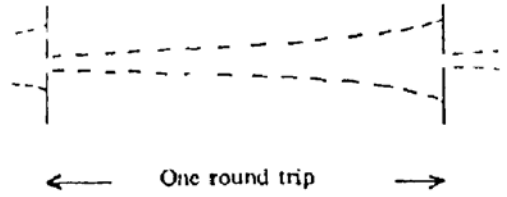


Fig. 1 Equivalent lens guide representation of the diffraction-filtered resonator

## 2 谐振腔的设计和理论模拟计算

图 2 表示一般形式的谐振腔结构<sup>[5]</sup>, 其中的透镜表征存在泵浦时, Nd:YAG 棒的热透镜( $\bar{F}$ ,  $\Delta F$ ), 其孔径为  $D = 2r_r = 6.3$  mm. 在 8 kW 电功率闪光灯泵浦时,  $\bar{F} = 259.3$  mm. 为设计具体的衍射损耗耦合型谐振腔, 要求: a) 腔内使用衍射滤波器, 从平面②到平面③→④→③→②最后到平面①为傅里叶变换系统, 平面①和②互成傅里叶面; b) 具有一定孔径的棒不成为损耗元件, 所有损耗都在圆斑镜处, 作为耦合输出, 而且其损耗关于  $\Delta F$  是对称的; c) 基横模体积足够大, 能最充分地从棒提取能量.

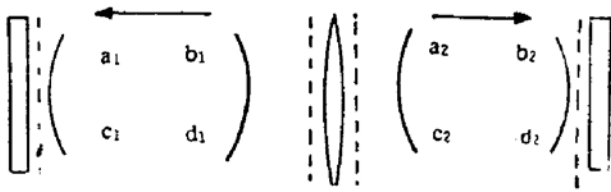


Fig. 2 The general resonator sandwiched by the thermal lens

为使棒的有限孔径不导致损耗, 要求平面③→④→③的光学传输矩阵中的  $\tilde{B}_2 = 2b_2d_2 = 0$  (意即菲涅尔数无穷大), 从而其衍射损耗可忽略. 使用曲率半径为  $R_2$  的后腔镜, 而从平面③→④是距离  $L_2 = R_2$  的自由空间的话, 则  $d_2 = 0$ , 从而保证  $\tilde{B}_2 = 0$ .

平面①和②互成傅里叶面, 则要求<sup>[7]</sup>:

$$d_1 = 0, \tag{1}$$

$$1/\bar{F} = 1/R_2 + a_1/b_1 \tag{2}$$

因此平面②→①→②光学传递矩阵中的  $\tilde{B}_1 = ab_1d_1 = 0$ , 平面①处不存在光阑的话, 则平面②处棒的有限孔径也不产生损耗. 同时考虑到  $\tilde{B}_2 = 0$ , 经过简单的矩阵运算, 可以发现这样的谐振腔工作在临界稳定点(Stability Limit).

傅里叶变换的另一个条件(2)式, 暗示着腔镜①和④的中心互为几何光学物像共轭点. 平面①处引入光阑, 热焦距满足(2)式的部分不存在损耗, 任何偏离(2)式的热焦距都将导致损耗, 数值模拟计算表明, 这样的损耗与焦距涨落  $\Delta F$  的函数关系是对称的.

按照上述分析, 作者设计如图 3 所示的衍射损耗耦合型谐振腔, 腔镜 1 为圆斑镜, 其斑半径为  $r_M$ , 反射率  $R$  与半径的关系为:

$$R = \begin{cases} 1 & r \leq r_M \\ 0 & r > r_M \end{cases} \tag{3}$$

$$R_1 \leftarrow L_1 = R_1 \rightarrow \leftarrow L_2 = R_2 \rightarrow R_2$$

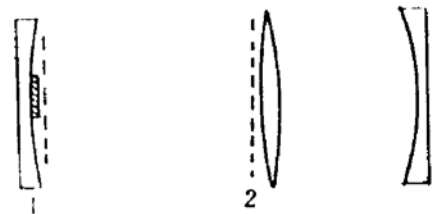


Fig. 3 The typical diffraction coupled resonator with the dot mirror

针对  $\bar{F} = 259.3 \text{ mm}$  的 Nd:YAG 棒, 为满足(2)式, 可以选用  $R_1 = 1000 \text{ mm}$ ,  $R_2 = 350 \text{ mm}$ . 傅里叶平面①和②间的菲涅尔数  $FN$  :

$$FN = \tau_M \tau_R / \lambda R_1 \tag{4}$$

使用菲涅尔衍射积分, 对谐振腔横模进行数值模拟计算. 在柱对称情况中, 入射场  $u_1(r_1)$  经光学系统 ABCD 后, 其出射场  $u_2(r)$  为<sup>[7]</sup>:

$$u_2(r) = \frac{2\pi j^{l+1}}{B\lambda} \int_0^\infty u_1(r_1) r_1 e^{-j\frac{\pi}{B\lambda}(Ar_1^2 + Dr^2)} J_l\left(\frac{2\pi}{B\lambda} r r_1\right) dr_1 \tag{5}$$

式中  $J_l$  为  $l$  阶贝塞尔函数. 这里采用 Power 方法<sup>[7]</sup>计算腔的基横模. 对上述特定泵浦功率的谐振腔结构(图 3), 唯一未确定的腔参数是  $FN$ (或  $\tau_M$ ), 理论计算表明对  $FN = 0.85$  ( $\tau_M = 0, 3 \text{ mm}$ )时, 基模模体积较大(见图 4 所示), 而其在棒孔径处的衍射损耗可忽略. 所有的衍射损耗均在圆斑镜处, 作为耦合输出. 衍射损耗与热焦距  $F$  的关系如图 5 所示.

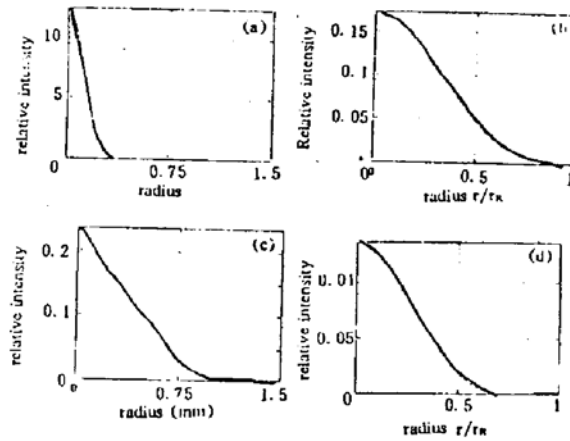


Fig. 4 Calculated fundamental modes: (a) Intensity profile at dot mirror when  $F = 259.3 \text{ mm}$ , (b) Intensity profile inside the rod when  $F = 259.3 \text{ mm}$ , (c) Intensity profile at dot mirror when  $F = 243 \text{ mm}$  ( $\Delta F/F = 5.6\%$ ) and (d) Intensity profile inside the rod when  $F = 243 \text{ mm}$  ( $\Delta F/F = 5.6\%$ )

### 3 实验结果和讨论

从图 5 的计算结果可知, 如果 Nd:YAG 棒的  $\bar{F} = 259.3 \text{ mm}$ , 对应于设计的工作点时, 总的衍射损耗最小. 所以在实验上, 可以适当改变电源的泵浦功率, 使得激光系统工作在本文设计的工作点, 从而输出激光功率最高. 同样道理, 具体的某一谐振腔结构只适用于某一特定的泵浦功率, 对不同的泵浦功率, 可以按照第二部分的程序设计. 在本文的实验中, Nd:YAG 棒尺寸为  $\phi 6.3 \text{ mm} \times 155 \text{ mm}$ , 泵浦脉宽  $4 \text{ ms}$ , 重复率  $15 \text{ Hz}$ , 获得了  $95 \text{ W}$  的激光输出. 采用二维 CCD 列阵测量光束强度分布, 近场输出光斑约  $\phi 1.5 \text{ mm}$ , 其中央部分是一凹陷, 这与理论数值计算结果图 4(c)相吻. 反过来它揭示激光棒的热焦距平均地有  $\pm 5.6\%$  的涨落, 整个谐振腔的损耗近似地按图 5 结果为  $78\%$ . 图 6 是实验测量所得的远场光强分布. 作为比较, 图中同时

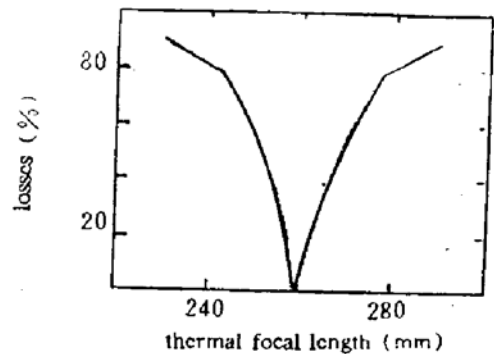


Fig. 5 Calculated resonator loss vs the thermal focal length

图 6 是实验测量所得的远场光强分布. 作为比较, 图中同时

给出了严格衍射转换极限激光的远场分布. 按  $M^2$  因子<sup>[8]</sup>定义光束质量, 其值为 1.6, 接近衍射转换极限.

对谐振腔的系统研究, 还需要考虑其失调敏感度. 实验上发现该类谐振腔的失调敏感较小. 圆斑镜和后腔镜 ( $R_2$ ) 对应功率下降一半的角度失调分别为 2 和 3 mrad, 保证了其实用性. 另外值得一提的是腔镜元件的破坏问题, 这对高功率激光器是非常重要的. 整个实验研究过程中, 从未发现过任何元件损伤, 这与在腔内使用傅里叶变换滤波器有关, 它消除了由衍射引起的对元件危害的热点 (Hot Spot).

**小 结** 作者设计了腔内使用衍射滤波器的新型谐振腔, 它对重复率、8 kW 脉冲泵浦的 Nd:YAG 激光器, 成功地获得了 95 W, 1.6 倍衍射极限的激光输出.

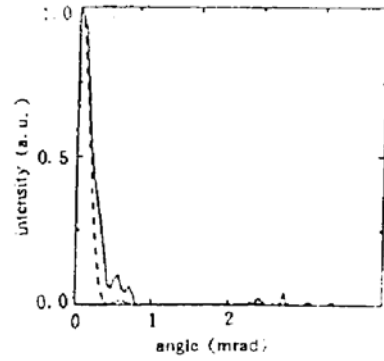


Fig. 6 The far field profile at 95 W output laser. The dashed line is corresponding to the diffraction limited beam

### 参 考 文 献

- [1] W. Koechner, *Solid-State Laser Engineering*, 2nd Ed., Berlin, Springer, 1988, 350~381
- [2] H. Vanherzeele, Thermal lensing measurement and compensation in a continuous-wave mode-locked Nd:YAG laser. *Opt. Lett.*, 1988, 13(5): 369~371
- [3] V. Magni, S. Desilvestri, L. J. Qian *et al.*, Rod-imaging supergaussian unstable resonator for high power solid-state lasers. *Opt. Commun.*, 1992, 94(11): 87~91
- [4] Diego Segala, *Graduation Dissertation*. Anno Academico 1991/1192, Politecnico di Milano, 1992, 13~95
- [5] V. Magni, Resonators for solid-state lasers with large-volume fundamental mode and high alignment stability. *Appl. Opt.*, 1986, 25(1): 107~117
- [6] G. Cerullo, S. Desilvestri, V. Magni, High efficiency 40 W CW Nd:YLF laser with large TEM<sub>00</sub> mode. *Opt. Commun.*, 1992, 93(9): 77~81
- [7] A. E. Siegman, *Lasers*. California, University Science Books Mill Valley, 1986, 629~811
- [8] A. E. Siegman, New developments in laser resonators, in laser resonators. D. A. Holmes, Ed., *Proc. SPIE*, 1990, 1224: 2~14

## Diffraction Coupled High Power Nd:YAG Lasers

Qian Liejia

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800)

(Received 7 May 1993; revised 8 July 1993)

**Abstract** In this paper, a novel resonator is proposed and designed for high power solid-state lasers, where the diffraction filter is used to get high quality beam, and the diffraction losses are used as useful output. We have obtained experimentally almost diffraction limited laser output with power near 100 Watts.

**Key words** thermal lensing, misalignment sensitivity.