

文章编号: 0258-7025(2009)Supplement 1-0040-03

板条激光器稳定腔与变反射率镜非稳腔的比较

齐恩宇 舒柏宏 许晓军 汪晓波 刘 亮

(国防科学技术大学光电与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 在固体板条介质激光器的研究中,为了同时获得高平均输出功率和高光束质量,开展了两类光学谐振腔在板条介质激光器上的对比研究,分别进行了稳定腔与非稳腔的模拟分析和实验研究,其中非稳腔采用一维渐变反射率输出耦合镜。稳定腔运转时,激光二极管(LD)抽运功率428 W条件下,获得了107 W的1064 nm激光功率输出,得到光束质量 $M_x^2=8.35$ (厚度方向), $M_y^2=32.29$ (宽度方向),板条晶体在宽度方向上的光束质量较差。为了进一步提高光束质量,使用了一维渐变反射率输出耦合镜构成的非稳腔,宽度光束质量有明显改善。

关键词 板条激光器; 非稳腔; 变反射率镜; 光束质量

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL200936s1.0040

Comparisons between Stable Resonator and Unstable Resonator with Variable Reflectivity Mirror for Slab Solid State Lasers

Qi Enyu Shu Bohong Xu Xiaojun Wang Xiaobo Liu Liang

(College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract In order to obtain both high average output power and good beam quality in slab solid state laser, research on comparisons between the stable and unstable resonators was carried out through theoretical analysis and experimental study. For stable resonator, the laser had output power of 107 W when the pump power was 428 W, which indicated $M_x^2=8.35$, $M_y^2=32.29$. However, the beam quality was poor in width direction. For unstable resonator, the beam quality could be significantly improved when an one-dimensional variable reflectivity mirror was used.

Key words slab lasers; unstable resonator; variable reflectivity mirror; beam quality

1 引言

众所周知,板条激光器是基于利用介质几何结构对称性和“之”形(Zig-Zag)光路来补偿热透镜效应、应力双折射和退偏效应,可以避免传统的棒状固体激光器在高功率抽运下产生的严重热效应和光束质量变差,而获得好的光束质量。但其在板条宽度方向上光斑尺寸大,聚焦性能差,使用常规稳定腔很难提高板条宽度方向的光束质量。非稳腔的光束质量与稳定腔相比明显提高,但非稳腔的主要缺点之一,是产生的环状输出光束包含有衍射环,其中心还会出现热斑。应用一维渐变反射率耦合输出镜,可以消除这一缺点^[2]。

本文从理论上分析了固体板条激光器稳定腔的特点,运用一维渐变反射率输出镜组成的非稳腔来

改善光束质量,并进行了实验研究。

2 稳定谐振腔分析

最常见的是由两镜腔构成的激光器,可以先讨论由这种谐振腔产生的最低阶模(TEM₀₀),通过TEM₀₀模的参量,能够进一步得到所有高阶模。

如图1所示, ω_0 为高斯光束束腰半径, ω_1 和 ω_2 分别是镜 M₁ 和 M₂ 的光斑半径; t_1, t_2 分别是束腰 ω_0 到镜 M_{1, 2} 的距离; R_{1, 2} 分别是间距为 L 的镜 M_{1, 2} 的曲率半径。

在谐振腔内、外所形成的束腰半径为

$$\omega_0^4 = \left(\frac{\lambda}{\pi}\right)^2 \left[\frac{L(R_1 - L)(R_2 - L)(R_1 + R_2 - L)}{(R_1 + R_2 - 2L)^2} \right], \quad (1)$$

基金项目: 国防科技基础研究基金资助课题。

作者简介: 齐恩宇(1979—),男,硕士,工程师,现主要从事固体激光器件方面的研究。E-mail: qienyu@163.com

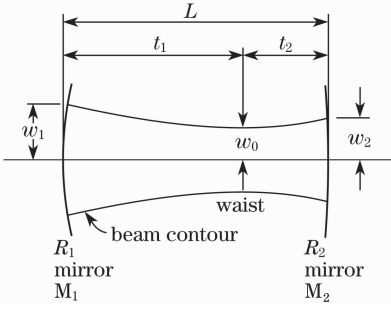


图1 不同曲率的两镜谐振腔的模参数

Fig. 1 Mode parameters of interest for a resonator with mirrors of unequal curvature

在镜上光束的曲率半径为

$$\omega_1^4 = \left(\frac{\lambda R_1}{\pi}\right)^2 \frac{R_2 - L}{R_1 - L} \left(\frac{L}{R_1 + R_2 - L}\right), \quad (2)$$

$$\omega_2^4 = \left(\frac{\lambda R_2}{\pi}\right)^2 \frac{R_1 - L}{R_2 - L} \left(\frac{L}{R_1 + R_2 - L}\right), \quad (3)$$

式中, λ 为输出激光的波长。

高平均功率固体激光器一般运转在多横模振荡状态以获得大模体积和高平均功率输出,此时往往以增益介质的截面(板条截面)决定限模孔径。多横模振荡束腰半径 ω_{ms} 与发散角 θ_{ms} 分别满足

$$\omega_{ms} = (2m + 1)^{1/2} \omega_{0s}, \quad (4)$$

$$\theta_{ms} = (2m + 1)^{1/2} \theta_{0s}, \quad (5)$$

式中, m 为矩形孔径下的横模阶次,可由位于限模孔径处的基模光斑半径 ω_0 与限模孔径的半径 r_0 得到

$$m = \frac{1}{2} \left(\frac{r_0^2}{\omega_0^2} - 1 \right). \quad (6)$$

由(4)~(6)式可以计算腔内高阶模的束腰和远场发散角,从而得到输出的光束质量。在谐振腔两镜之间距离为 23 cm,板条位于谐振腔中心时,采用平凹谐振腔,球面镜曲率半径 $R_1 = 2$ m 时的 M^2 因子少于: $M_x^2 = 7$ (厚度方向), $M_y^2 = 37$ (宽度方向)。

可以看出在厚度方向光束质量较好,在宽度方向光束质量较差。

3 一维渐变反射率非稳腔分析

一维渐变反射率镜的高斯型反射分布如图 2 所示。

在 y 方向上的反射分布满足

$$R(y) = R_{MAX} \exp[-2(y/\omega_M)^2], \quad (7)$$

式中, R_{MAX} 为中心的峰值反射率, ω_M 为光束在镜面上的光斑尺寸或反射率降到峰值的 $1/e^2$ 时的径向距离。通过调节最大的反射率 R_{MAX} , 宽度 ω_M 就能够优化具有特定放大率的特定振荡器的输出能量同时又维持光滑的输出光束。

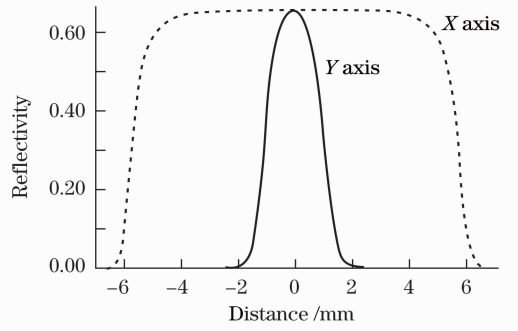


图2 一维渐变反射率输出镜的反射分布

Fig. 2 Reflectivity profile of one dimensional hyper-Gaussian mirror

对于包含有反射率可变的耦合输出器的非稳腔,放大率 M 的表达式为

$$M = [1 + (\omega/\omega_M)^2]^{1/2}. \quad (8)$$

由反射率可变的镜构成的谐振腔产生的有效耦合输出,取决于镜的平均反射率,这种反射率随入射光束的分布而变化,对于高斯光束(TEM₀₀),有效的平均反射率为

$$R_{eff,00} = R_{MAX}/M^2, \quad (9)$$

对于高阶模,有效平均反射率为^[9]

$$R_{eff,m} = R_{MAX}/M^{2(2m+n+1)}. \quad (10)$$

由此可以看出,非稳腔的高阶模的损耗随着基模阶数的增大按指数增大,从而部分高阶模被有效抑制。

方形镜稳定共焦腔的单程衍射损耗如图 3 所示。在 $N \leq 2$ 范围内,在具有相同菲涅耳数条件下,腔内衍射损耗随着模的阶数的增加而增加;当 $N \geq 2$ 时,损耗几乎为零,即是说所有满足(6)式的高阶模均能够存在。

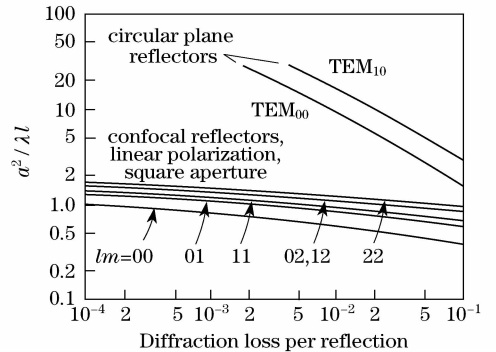


图3 方形镜共焦腔的单程衍射损耗

Fig. 3 Single pass diffractive loss of rectangular mirrors cavity with common focus

因此,在保证具有相同的菲涅耳数的前提下,使用一维渐变反射率输出镜的非稳腔可以在其非稳腔方向提高光束质量。

4 实验装置及结果

实验使用掺钕钇铝石榴石(Nd:YAG)板条式激光介质,如图4所示,尺寸为66.3 mm×5.7 mm×1.7 mm,端面切角45°,板条中间49 mm部分有0.2%掺杂。光束在介质内被全内反射,沿Zig-Zag光路行进。使用激光二极管(LD)阵列进行耦合抽运,板条激光介质采用热沉夹持冷却。

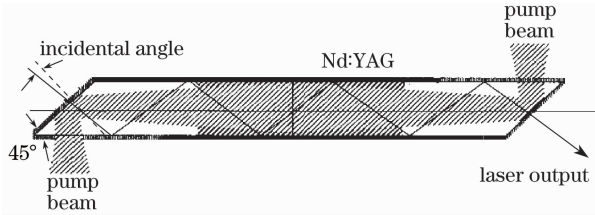
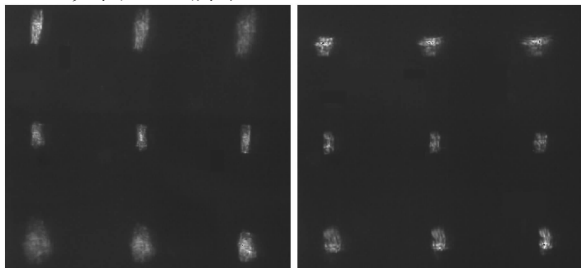


图4 传导冷却端面抽运板条介质

Fig. 4 End-pumped, conduction cooled Nd:YAG Zig-Zag slab laser

稳定腔运转时,采用了高反球面镜和透过率为50%的平面镜构成谐振腔,球面镜曲率半径 $R=2$ m,两镜之间距离约为16 cm,经过板条几何光路计算^[10]可得出谐振腔光学长度约为23 cm。使用 M^2 因子测量仪^[6]测量光束质量。在LD抽运功率为428 W时,输出激光平均功率为107 W,光束质量 $M_x^2=8.35, M_y^2=32.29$,如图5(a)所示。

根据板条介质几何结构特点,使用了非轴对称镜,凸柱面一维渐变反射率输出镜的母线在 x 方向上,反射率沿母线方向为均匀分布,在 y 方向曲率半径 $R_1=-1.5$ m;全反镜为平凹柱面镜,曲率半径 $R_2=6$ m,母线沿 x 方向,谐振腔长度和稳定腔相同约为23 cm。这样就在 x 方向形成稳定腔,在 y 方向是一个非稳腔。在抽运功率为428 W时,得到63 W的平均功率输出,光束质量 $M_x^2=10.22, M_y^2=12.43$,如图5(b)所示。



(a)

(b)

图5 稳定腔与非稳腔的光束质量测量结果。

(a) 稳定腔; (b) 非稳腔

Fig. 5 Measurement result of beam quality in (a) stable resonator; (b) unstable resonator

5 结 论

从理论上定性分析了端面抽运Nd:YAG板条式激光器稳定腔与非稳腔的高阶模损耗机制,在实验中实现了两种腔型并进行了光束质量测量,实验表明:利用一维渐变反射率耦合输出镜可以改善板条激光器在宽度方向的光束质量,与分析结果相一致。

参 考 文 献

- 1 Stephen Palese, Joseph Harkenrider, Wuiam Long *et al.*. High brightness, end-pumped, conduction cooled Nd:YAG zig-zag slab laser architecture[C]. Advanced Solid-State Lasers, OSA, 2001
- 2 Feng Guoying, Lü Baida, Cai Bangwei *et al.* Experimental study of the (Nd, Ce):YAG slab laser using an axis-asymmetric positive confocal resonator with a ID variable reflectivity mirror[J]. *Chinese J. Laser.* 1997, **A24**(1): 13~16
- 3 冯国英, 吕百达, 蔡邦维等. 1D VRM非轴对称虚共焦腔(Nd, Ce):YAG板条激光器的实验研究[J]. *中国激光*, 1997, **A24**(1): 13~16
- 3 Wang Ning, Lu Yutian. Partially end-pumped Nd:YVO₄ slab solid state laser[J]. *Chinese J. Laser.*, 2006, **33**(10): 1319~1323
- 王宁, 陆雨田. 部分端面抽运的Nd:YVO₄板条固体激光器[J]. *中国激光*, 2006, **33**(10): 1319~1323
- 4 W. Koehner Solid-State Laser Engineering [M]. New York: Springer-Verlag, 1976
- 5 Yang Wenshi, Bi Guojiang, Sun Weina *et al.* The experimental research of Nd:YAG slab laser side pumped by large-scale diode array[J]. *Laser & Infrared.*, 2005, **35**(12): 926~928
- 杨文是, 秘国江, 孙维娜等. LD阵列面状泵浦Nd:YAG板条激光器实验研究[J]. *激光与红外*, 2005, **35**(12): 926~928
- 6 Xi Fengjie. Design and application studies on the curvature sensor with a grating [D]. Changsha: National University of Defense Technology., 2008.12
- 习锋杰. 光栅型曲率传感器的设计与应用研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2008.12
- 7 Xue Haizhong, Lu Fuyuan, Xue Mei *et al.* Resonator design and beam quality measurement in Yb:YAG slab lasers[J]. *Laser Technology*, 2006, **30**(6): 585~588
- 薛海中, 陆富源, 薛梅等. Yb:YAG板条激光器谐振腔设计与光束质量测量[J]. *激光技术*, 2006, **30**(6): 585~588
- 8 Zhou Bingkun, Gao Yizhi, Chen Tirong *et al.* Lasers [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2000. 52~54
- 周炳昆, 高以智, 陈侗嵘等. *激光原理*[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000. 52~54
- 9 H. Webet. *Laser Resonators*[M]. Wuhan: Huazhong Institute of Technology Press, 1983
- 韦伯著, 丘军林, 孙荫译. *激光谐振腔*[M]. 武汉: 华中工学院出版社, 1983
- 10 Zhao Haichuan, Xu Xiaojun, Wang Xiaobo. Geometric analysis of optical path in the zig-zag slab amplifier system[C]. 2nd Academic Forum of the Aerospace Electronic Warfare Committee of the Electronic Warfare Division of the Chinese Institute of Electronics 赵海川, 许晓军, 汪晓波. Zig-Zag板条放大器光路的几何分析[C]. 中国电子学会电子对抗分会航天电子对抗专业委员会第二届学术年会.