

文章编号: 0258-7025(2010)Supplement 1-0035-04

# Zig-zag 板条激光器稳定/非稳定谐振腔分析

汪晓波 许晓军 齐恩宇 郭少锋 陈金宝 刘泽金

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要** 通常激光器通过谐振腔菲涅耳数选取横模,但 zig-zag 板条激光器的特殊结构决定无法仅通过调整谐振腔的腔长同时选取厚度方向和宽度方向的横模。采用一维渐变反射率输出耦合镜,实现 zig-zag 板条激光器厚度方向的稳定腔和宽度方向的非稳定腔,可以达到两个方向上同时选取低阶横模的要求。计算厚度方向和宽度方向的稳定/非稳定腔各阶横模的衍射损耗,得出其选模效果与宽度方向采用一维渐变反射率输出耦合镜的计算结果进行比较,得出采用一维渐变反射率输出耦合镜的稳定/非稳定腔能够同时实现厚度方向和宽度方向的选模;理论分析结果已经得到实验的初步验证。

**关键词** 激光器; zig-zag 板条激光器; 数值模拟; 稳定/非稳定谐振腔; 一维渐变反射率输出耦合镜

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201037s1.0035

## Analysing the Stable /Unstable Resonators of Zig-Zag Slab Lasers

Wang Xiaobo Xu Xiaojun Qi Enyu Guo Shaofeng Chen Jinbao Liu Zejin

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

**Abstract** Lasers transverse modes are often selected by the Fresnel number of the resonators. However, the Fresnel number of the thickness direction and width direction is very different in slab lasers, so lasers transverse modes of the thickness direction and width direction can not be selected only by the length of the resonators at the same time. The output coupling mirror with one-dimensional variable reflectivity is used in the stable/unstable resonators. The structure can select the low transverse modes of the thickness direction and width direction at the same time. In this paper, the losses of different resonators have been calculated. The theoretical analysis has been verified by the results of the preliminary experiments.

**Key words** lasers; zig-zag slab lasers; numerical calculation; stable /unstable resonators; one-dimensional variable reflectivity

### 1 引 言

zig-zag 板条激光器在高平均功率固体激光器中占有重要地位。zig-zag 板条激光器的显著优点有两点:矩形结构消除了应力双折射效应;光沿着 Z 形路径传播,消除了热感生的聚焦和应力感生的聚焦。Z 形板条激光器的平均功率上限有理论上的优势,是高平均功率固体激光器最具有潜力的方案之一<sup>[1]</sup>。2009 年 Northrop-Grumman 公司研制出了平均功率高达 105 kW 的板条激光器<sup>[2]</sup>。

通常激光器通过谐振腔结构选取低级横模,但

zig-zag 板条激光振荡器的特殊结构决定无法仅通过谐振腔的长度同时选取厚度方向和宽度方向的横模。由于低阶横模的光束发散角小,亮度高,因此很多应用中,都希望激光器运转在低阶横模上。谐振腔的几何结构对选模能力有很大影响。根据菲涅耳数与衍射损耗关系,可得菲涅耳数为 0.5~2.0 时,激光输出基本为基横模。但 zig-zag 板条激光器厚度方向与宽度方向的菲涅耳数相差 10 倍左右甚至更多,无法仅通过谐振腔的几何结构实现厚度方向与宽度方向的横模选取。采用一维渐变反射率输出

收稿日期: 2010-03-16; 收到修改稿日期: 2010-04-20

基金项目: 国防预研基金资助课题。

作者简介: 汪晓波(1982—),男,博士,讲师,主要从事固体激光器方面的研究。E-mail: xiaobowang1982@yahoo.com.cn

耦合镜,可以同时实现 zig-zag 板条激光器厚度方向的稳定腔和宽度方向的非稳定腔,达到两个方向上同时选取低阶横模的要求<sup>[3]</sup>。

## 2 zig-zag 板条激光器基本参数

对于 zig-zag 板条激光器,以下参数是合理的:谐振腔长度为 1 m,激光波长 1.064  $\mu\text{m}$ ,板条晶体厚度 1.7 mm,宽度方向为 5.6 mm,板条端面的切割角为 45°。因为需要考虑激光在晶体内部的全反射,谐振腔内激光与激光晶体端面法线合理夹角应为 29°左右。激光垂直于端面入射。可见厚度方向有效孔径半径为 1.05 mm,宽度方向有效孔径半径为 2.8 mm。

根据菲涅耳数计算公式

$$N = \frac{a^2}{L\lambda}, \quad (1)$$

式中  $a$  为有效孔径半径, $L$  为腔长。由此可以得出厚度方向的菲涅耳数约为 1.036,宽度方向的菲涅耳数约为 7.368。根据经验数据:菲涅耳数为 0.5~2.0 时,激光输出基本为基横模。可见厚度方向的激光输出基本为基横模,宽度方向难以仅通过菲涅耳数选择出低阶横模。假设 zig-zag 板条激光器谐振腔为平凹稳定腔,反射镜凹面全反,曲率半径 2 m,板条处于激光谐振腔的中心处。根据平凹稳定腔的基横模光斑半径计算公式

$$w_0^2 = \frac{\lambda}{2\pi} [L(2R-L)]^{1/2}, \quad (2)$$

平面输出镜处的基横模光束腰斑半径为 0.58 mm。假设激光晶体放置在谐振腔的中间,则激光晶体表面基横模的腰斑半径为 0.65 mm,在反射镜处的腰斑半径为 0.82 mm。

## 3 zig-zag 板条激光器谐振腔各阶横模计算分析

计算采用普通反射镜的稳定腔对各阶横模的鉴别能力,这种谐振腔的模式鉴别能力主要来自于衍射损耗。对于 zig-zag 板条激光器稳定谐振腔来说,晶体口径可以等效为矩形光阑,在矩形光阑的影响下,TEM<sub>mn</sub> 模的光强分布为<sup>[4]</sup>

$$I_{mn}(x, y, z) = I_0 \left\{ H_m \left[ \frac{\sqrt{2}x}{w(z)} \right] \exp \left[ \frac{-x^2}{w^2(z)} \right] \right\}^2 \times \left\{ H_n \left[ \frac{\sqrt{2}y}{w(z)} \right] \exp \left[ \frac{-y^2}{w^2(z)} \right] \right\}^2, \quad (3)$$

式中  $x$  表示宽度方向的坐标, $y$  表示厚度方向的坐

标, $z$  表示在光轴上的坐标, $H$  为哈密顿函数, $m$  为宽度方向的横模阶数, $n$  为厚度方向的横模阶数。从(3)式中可以看出  $x$  方向和  $y$  方向的光强分布基本相互独立,互不影响。根据(3)式可以计算出宽度方向衍射损耗随阶变数化不大;厚度方向衍射损耗随阶数变化明显。图 1 为 TEM<sub>m0</sub> 横模和 TEM<sub>0n</sub> 横模在稳定/稳定腔中的衍射损耗。

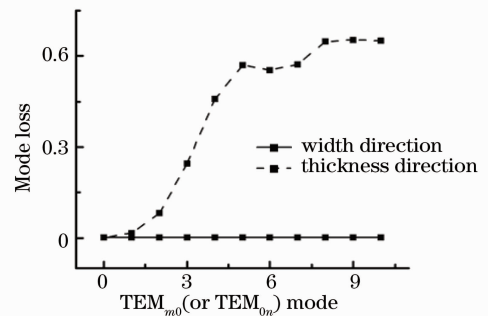


图 1 宽度方向各阶 TEM<sub>m0</sub> 横模和厚度方向各阶 TEM<sub>0n</sub> 横模在稳定/稳定腔中的衍射损耗

Fig. 1 Diffraction loss in width direction TEM<sub>m0</sub> and thickness direction TEM<sub>0n</sub> in stable /stable resonators

从计算结果中可以看出,在适当的增益条件下,厚度方向低阶横模能够优先起振,高阶横模能够被抑制;但是宽度方向无论低阶横模还是高阶横模的衍射损耗都接近于零,所以可以判断宽度方向的高阶横模很难抑制,将随低阶横模一起起振。假设输出镜的输出耦合率为 50%,均匀一致的输出耦合率对各阶横模相等,所以不能提升激光谐振腔的模式鉴别能力。

如果采用宽度方向渐变的一维渐变反射率输出镜,这种反射镜通常中间反射率高,两边反射率低。可以预期,低阶横模的主要功率集中在中间部分,所以损耗低;而高阶横模的功率分布比较均匀,则损耗高。

计算采用宽度方向渐变反射率的一维非稳腔的损耗,需要考虑到各阶横模的光强分布与各阶横模的相互耦合,则各阶横模在反射镜点( $x, y$ )处损耗公式为

$$L_{mn}(x, y, z) = I_0 \left\{ H_m \left[ \frac{\sqrt{2}x}{w(z)} \right] \exp \left[ \frac{-x^2}{w^2(z)} \right] \right\}^2 \times \left\{ H_n \left[ \frac{\sqrt{2}y}{w(z)} \right] \exp \left[ \frac{-y^2}{w^2(z)} \right] \right\}^2 \times T(x), \quad (4)$$

非稳定腔内输出镜的渐变反射率呈高斯分布,中间最高为 60%,两边反射率为 0,高斯半径为 1 mm,则在反射损耗和衍射损耗的共同作用下各阶横模的损耗如图 2 所示。

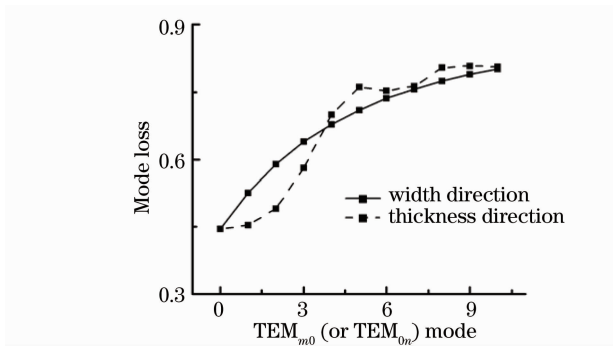


图 2 宽度方向 TEM<sub>m0</sub> 横模和厚度方向 TEM<sub>0n</sub> 横模在非稳定/稳定腔中的总损耗

Fig. 2 Total loss in width direction TEM<sub>m0</sub> and thickness direction TEM<sub>0n</sub> in unstable /stable resonator

从计算结果中可以看出,厚度方向与此前采用反射率均匀一致的输出镜一样,低阶横模能够优先起振,高阶横模能够被抑制;但是宽度方向与此前不同,低阶横模与高阶横模的损耗有明显差异,适当增益条件下低阶横模能够优先起振,高阶横模能够被抑制。采用渐变反射率的输出镜的反射损耗与适当菲涅耳数的衍射损耗相比,没有迅速的变化趋势,这导致了采用渐变反射率的输出镜时可能同时会起振几个低阶模。总的来说,采用一维渐变反射率的输出镜构成的非稳定/稳定谐振腔,在宽度方向和厚度方向都具有一定的模式鉴别能力。

以上的理论分析过程基本能够反映 zig-zag 板条激光谐振腔的情况,但是还存在一些问题,采用一维渐变反射率输出镜的非稳定/稳定腔的光强分布与采用普通反射镜的稳定/稳定腔是有区别的,采用稳定腔内的横模光强分布直接与渐变反射率耦合计算损耗,应该会引入一定的误差。但是这种分析计算方法能够基本反映 zig-zag 板条激光谐振腔的横模选择能力。

#### 4 实验结果与理论结果对比

实验室中的 zig-zag 板条激光器参数为<sup>[5]</sup>:谐振腔光学长度约为 220 mm,激光波长 1.064 μm,板条晶体厚度 1.7 mm,宽度方向为 5.6 mm,板条端面的切割角为 45°。因为需要考虑激光在晶体内部的全反射,谐振腔内激光与激光晶体端面法线夹角为 29°。稳定/稳定腔时使用的输出镜耦合率为 50%,根据此前的计算方法,可得宽度方向和厚度方向各阶横模的衍射损耗,如图 3 所示。

从计算结果中可以看出,宽度方向缺乏低阶横模的鉴别能力,厚度方向阶数超过 5 的横模难以起

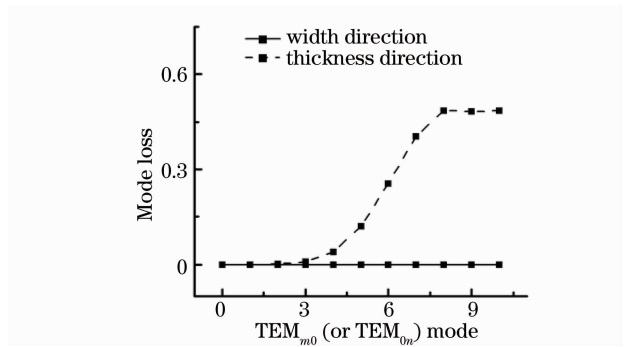


图 3 实验中宽度方向各阶 TEM<sub>m0</sub> 横模和厚度方向各阶 TEM<sub>0n</sub> 横模在稳定/稳定腔中的衍射损耗

Fig. 3 Experimental diffraction loss in width direction TEM<sub>m0</sub> and thickness direction TEM<sub>0n</sub> in the stable / stable resonators

振。当抽运功率为 428 W 时,输出平均功率为 107 W。实际上采用曲率传感器测得的稳定/稳定腔输出的不同位置的光斑大小如图 4 所示。

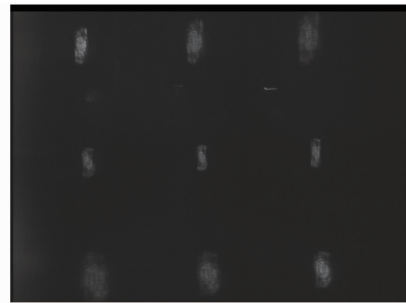


图 4 采用曲率传感器测得的稳定/稳定腔输出的不同位置的光斑大小

Fig. 4 Laser profiles of the stable/stable cavity by curvature sensor

此时晶体宽度方向的光束质量为  $M^2 = 32.29$ , 晶体厚度方向的光束质量为  $M^2 = 8.35$ 。

采用的一维渐变耦合输出率为 一维高斯分布,中心透射率为 34%,边缘透射率为 97%,高斯半径约为 0.75 mm。根据此前的分析方法,可得宽度方向和厚度方向各阶横模的损耗如图 5 所示。

从计算结果中可以看出,与稳定/稳定腔不同的是宽度方向具有一定的低阶模式鉴别能力,宽度方向阶数 3 以上的损耗就已经比较大了;而厚度方向与此前稳定/稳定腔的结果一致,厚度方向阶数超过 5 的横模难以起振。实际上采用曲率传感器测得的非稳定/稳定腔不同位置的光斑大小如图 6 所示。

此时晶体宽度方向的光束质量为  $M^2 = 12.43$ , 晶体厚度方向的光束质量为  $M^2 = 10.22$ 。同等抽运功率水平下,输出平均功率下降到 67 W,仅约为此

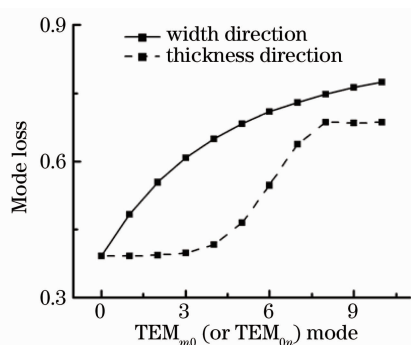


图5 实验中宽度方向各阶  $TEM_{m0}$  横模和厚度方向各阶  $TEM_{0n}$  横模在非稳定/稳定腔中的总损耗

Fig. 5 Experimental total loss in width direction  $TEM_{m0}$  and thickness direction  $TEM_{0n}$  in the unstable / stable resonators

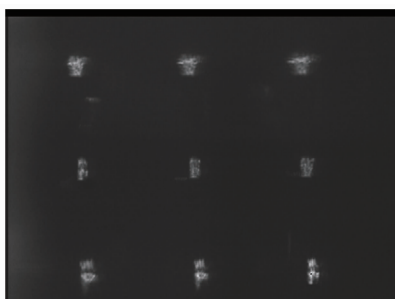


图6 采用曲率传感器测得的非稳定/稳定腔输出的不同位置的光斑大小

Fig. 6 Laser profiles of the unstable/stable cavity 前的一半。

理论分析得出的振荡横模阶数与实验测得的光束质量结果基本对应。实际实验未能使用板条模块获得近衍射极限的光束质量,主要原因是实际板条模块与理想的板条模块差别很大:实际板条模块因

为加工工艺受限,存在着明显的热效应,造成严重的波前畸变,导致光束质量的退化和光强分布的不均匀。

## 5 结 论

通常激光器通过谐振腔结构选取低阶横模,但 zig-zag 板条激光器的特殊结构决定无法仅通过调整谐振腔的长度同时选取厚度方向和宽度方向的横模。根据菲涅耳数与衍射损耗关系,可得菲涅耳数为  $0.5 \sim 2.0$  时,激光输出基本为基横模。但 zig-zag 板条激光器厚度方向的菲涅耳数与宽度方向的菲涅耳数相差很大。通常宽度方向衍射损耗随阶数变化不大;厚度方向的衍射损耗随阶数变化明显。输出耦合镜采用渐变反射率镀膜时,宽度方向各阶横模的损耗差异变大,使得宽度方向也能选取低阶横模。

## 参 考 文 献

- 1 W. Koechner. Solid-State Laser Engineering [M]. Heidelberg: Springer, 2006
  - 2 [http://www.irconnect.com/noc/press/pages/news\\_releases.html?d=161575](http://www.irconnect.com/noc/press/pages/news_releases.html?d=161575)
  - 3 Stephen Palese, Joseph Harkenrider, William Long *et al.*. High brightness, end-pumped, conduction cooled Nd:YAG zig-zag slab laser architecture [C]. Advanced Solid-State Lasers Proceedings, 2001, **50**: 41~46
  - 4 Anthony E. Siegman. Lasers [M]. Miu Valley: University Science Books, 1986
  - 5 Qi Enyu, Shu Bohong, Xu Xiaojun *et al.*. Comparisons between stable resonator and unstable resonator with variable reflectivity mirror for slab solid state lasers [J]. Chinese J. Lasers, 2009, **36**(s1): 40~42
- 齐恩宇, 舒柏宏, 许晓军等. 板条激光器稳定腔与变反射率镜非稳腔的比较 [J]. 中国激光, 2009, **36**(s1): 40~42