

文章编号: 0253-2239(2004)04-491-4

# 大功率部分端面抽运混合腔板条激光器

石 鹏<sup>1</sup> 李代军<sup>2</sup> 张恒利<sup>2</sup> 杜可明<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)  
(<sup>2</sup> EdgeWave GmbH, D-52074, Aachen, Germany)

**摘要:** 在半导体抽运的全固态激光器中,激光晶体上的热畸变限制了激光器在大功率下输出时保持高光束质量的能力。板条结构的固体激光器具有优异的散热能力,再配合部分端面抽运以及稳-非稳柱面混合腔的使用,使大功率高光束质量的激光输出成为可能。在德国 EdgeWave GmbH 进行的对这一技术的合作研究中,利用不到 100 mm 的腔长,在 Nd:YVO<sub>4</sub> 板条激光器上获得了 110 W 近衍射极限的 1.06 μm 连续激光输出,这时在非稳腔方向上的光束传播因子  $M^2$  为 1.3,在稳腔方向上为 1.5。通过对输出激光进行空间滤波切除除镜造成的衍射旁瓣后,50 W 输出时  $M^2$  的典型值在非稳腔和稳腔方向上分别为 1.09 和 1.2。

**关键词:** 应用光学; 二极管抽运固体激光器; 板条激光器; 混合腔; Nd:YVO<sub>4</sub>; 光束质量  
中图分类号: TN248.1 文献标识码: A

## High Power Partially End-Pumped Slab Laser with Hybrid Resonator

Shi Peng<sup>1</sup> Li Daijun<sup>2</sup> Zhang Hengli<sup>2</sup> Du Keming<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Shanghai Institute of Optics and fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)  
(<sup>2</sup> EdgeWave GmbH, D-52074, Aachen, Germany)

(Received 8 May 2003; revised 2 July 2003)

**Abstract:** In laser diode-pumped solid-state lasers, the thermal induced distortion in laser crystal limits the scalability of high power output with high beam quality. Partially end-pumped slab laser with a stable-unstable hybrid resonator is an effective way to solve this problem. 110 W output with nearly diffractive-limit is obtained using Nd:YVO<sub>4</sub> as the gain media and a cavity less than 100 mm. The beam propagation factor  $M^2$  are 1.3 and 1.5 in the unstable and stable directions respectively at this power level. Spatial filtering to cut the side lobes caused by hard-edge diffraction of output resonator mirror is also demonstrated. The typical propagation factors  $M^2$  are 1.09 and 1.2 after a spatial filter at 50 W operation.

**Key words:** applied optics; diode pumped solid state laser; slab laser; hybrid resonator; Nd:YVO<sub>4</sub>; beam propagation factor

近年来,大功率半导体抽运固体激光器的研究取得了长足的发展,更由于其具有高效、长寿、使用与维护方便、体积小等优点,在激光打标、精细加工、医疗、遥感、测距等方面得到了越来越广泛的应用<sup>[1,2]</sup>。随着功率的增加,激光晶体中热致应力和应变限制了输出激光在大功率下保持高光束质量的能力<sup>[3,4]</sup>。在常用的激光增益介质中,Nd:YVO<sub>4</sub>具

有增益高、偏振输出等特点备受青睐,但同时它的热导差、抗损伤阈值低等缺点又把它的应用范围主要局限于较低的功率水平<sup>[5~7]</sup>。使用板条状和薄片状<sup>[7,8]</sup>的增益介质,利用晶体的大面进行冷却,可以最有效的实现散热,降低晶体中的热畸变。但在薄片激光器中,如果抽运能量集中于一个较小的区域内,则加重了散热的要求;如果能量比较分散,为了实现较大的基模体积同时保证较高的效率,就难以保证紧凑的系统尺寸。

德国夫琅禾费激光技术研究所的杜可明等<sup>[3]</sup>提

E-mail: shipeng@siom.ac.cn

收稿日期:2003-05-08;收到修改稿日期:2003-07-02

出了部分端面抽运的板条激光器配以混合腔的方案,可以在紧凑的空间内实现在大功率下保持高光束质量的激光振荡输出。本文介绍这一技术在德国的 EdgeWave GmbH 开展合作研究的实验结果。

实验所用的混合腔由两个全反柱面镜放置于共焦位置组成(如图 1~图 3 所示), $M_1$  为凹面镜, $M_2$  为凸面镜,故腔长由它们的曲率半径决定

$$L = (R_1 - R_2)/2, \quad (1)$$

其中  $R_1$  和  $R_2$  分别为两腔镜的曲率半径。腔镜的柱面轴均位于竖直平面内。因此,在水平面内,它们构成了一个共焦非稳腔,在竖直平面内则构成平-平腔。

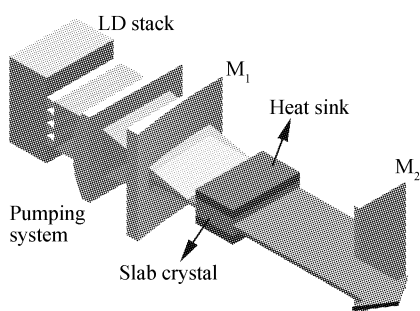


Fig. 1 Scheme of the system

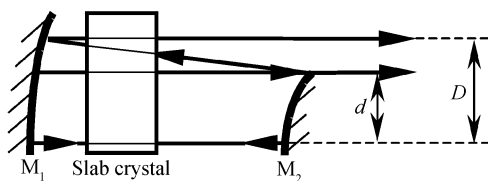


Fig. 2 Confocal unstable resonator

非稳腔能够有效地抑制高阶模,因此能够从大尺寸的增益介质中得到接近衍射极限的光束输出。故将板条状增益介质的大尺寸方向放置于非稳腔方向,即激光晶体水平放置。共焦非稳腔的一个主要优势则在于,从输入腔镜往输出腔镜传播的激光振荡会被输入腔镜自动准直。很容易可以推出用凹镜与凸镜组成的共焦非稳腔的  $g$  因子大于 0,为正支非稳腔。与负支非稳腔相比,这样的结构不会在腔内出现振荡激光的焦点<sup>[9]</sup>,同时腔内振荡激光的发散角较小,这都有利于之后进一步的调 Q 运行。显然,非稳腔方向上的热透镜会直接地影响输出光束的质量,因此,必须在非稳腔方向上实现均匀的抽运从而消除在该方向上的热梯度。

激光振荡在腔里每走一个来回,其几何尺寸在非稳腔方向上都会被放大  $M$  倍,称为激光腔的放大率<sup>[9]</sup>。很容易可以推导出, $M$  由两个柱面镜的曲率半径的比值决定

$$M = D/d = R_1/R_2, \quad (2)$$

根据文献[9],共焦非稳腔的输出耦合近似由其放大率  $M$  决定。从非稳腔方向考虑,激光每在腔里走一个来回,从输出腔镜  $M_2$  的边缘输出指数为  $(D-d)/D$  的能量;从稳腔方向考虑,由于是高反平-平腔,激光能量不会输出。故相应的混合腔的输出耦合为

$$T = \frac{D-d}{D} = 1 - \frac{1}{M}, \quad (3)$$

与传统板条激光器相比,在激光晶体的小尺寸方向上,抽运光不会充满整个晶体的入射端面,而只是抽运了晶体的一部分,即晶体的中央,故称之为部分端面抽运。这样在晶体的小尺寸方向上就会因抽运而引入一个热透镜  $f_T$ ,故在此方向上的腔就可以等效为图 3(b)所示。可以得到图 3(b)这样的腔的  $g$  因子为

$$g = \left(1 - \frac{L_2}{f_T}\right) \left(1 - \frac{L_1}{f_T}\right)$$

$f_T$  的大小受晶体的热导及抽运光的功率密度影响,而抽运光的功率密度则受抽运功率及晶体上的抽运线的粗细所决定。通过选择合适的  $L_1$ 、 $L_2$  以及抽运线的宽度,可以保证当抽运功率在工作范围内变化时,腔的  $g$  因子保持在  $0 < g < 1$  范围内,即腔处于热稳状态。

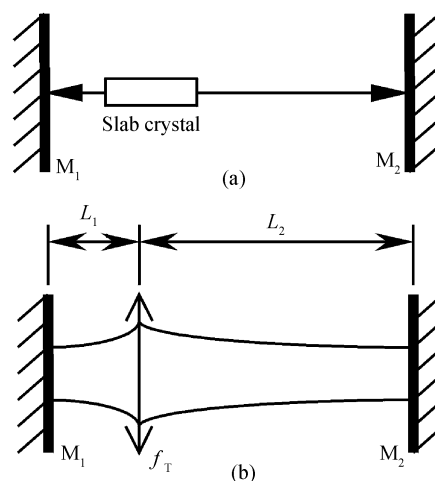


Fig. 3 Stable resonator. (a) Flat-flat cavity  
(b) Equivalent cavity

实验装置如图 4 所示。抽运源采用了由 8 个线列阵半导体激光器组成的半导体激光器堆(LD stack)。每个线列阵半导体激光器前都装有微柱透镜对输出激光的快方向进行准直,使其在快方向基本为平行光。由于线列阵半导体激光器的发光点本身就不是均匀分布的,而由于制造、老化等原因,各个发光点实际输出的激光功率也不均匀,再加上组

成半导体激光器堆的各个线列阵激光器的性能也不一致,而混合腔要求在非稳腔方向上得到分布均匀的抽运线,就必须对抽运光进行整形。我们用柱透镜压缩抽运光的慢方向,使其聚入一个平面波导中。利用波导可以在比较短的长度上使抽运光在半导体激光器的慢方向上混合均匀,从而得到了在该方向

上(也就是非稳腔方向)均匀分布的抽运线。经波导整形输出的抽运激光再经过柱透镜和球面镜组成的成像系统得到一条横截面近似为长方线的抽运线并耦合到 Nd:YVO<sub>4</sub> 板条晶体上。抽运线的截面尺寸约为 0.6 mm×12 mm。经实际测量,这套整形耦合系统的效率约为 90%。

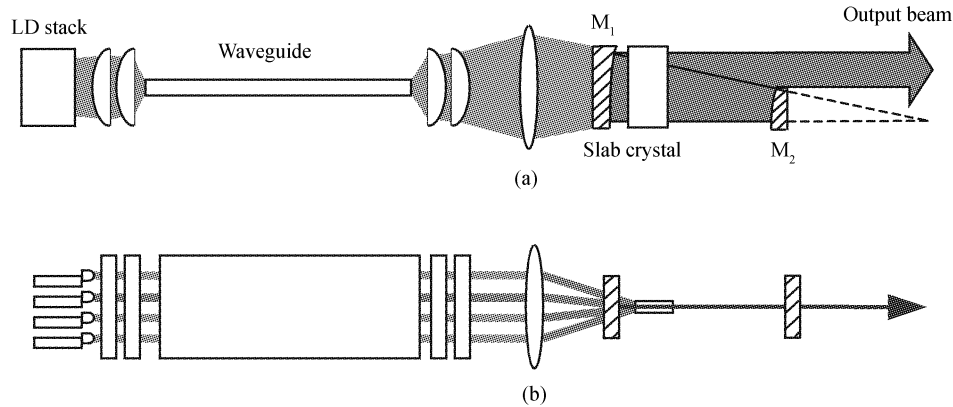


Fig. 4 Experimental setup. (a) Horizontal direction; (b) Vertical direction

实验所用的 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体中 Nd 的粒子数分数为 0.003,尺寸为 1 mm×10 mm×12 mm 的板条状晶体。在两个 10 mm×12 mm 的大面上安装水冷热沉以获得最佳的散热效果。板条晶体只有两个 1 mm×12 mm 的小面需要抛光,并镀有对 808 nm 及 1.06 μm 的增透。

谐振腔由一个凹面镜和一个凸面镜组成,其中凹面镜为输入腔镜,镀有 808 nm 的增透膜和 1.06 μm 的全反膜,凸面镜镀有 1.06 μm 的全反膜。两腔镜的曲率半径为分别  $R_1=500$  mm 和  $R_2=350$  mm,由公式(1)可知腔长约为 80 mm。根据(2)式和(3)式可以算出非稳腔的放大率为  $M=1.4$ ,对应的输出耦合为  $T=30\%$ 。

图 5 为该激光器的输出功率曲线,其中的抽运功率为经过波导整形耦合系统后的抽运光的功率。在抽运功率为 247 W 时,获得了 110 W 的输出,此

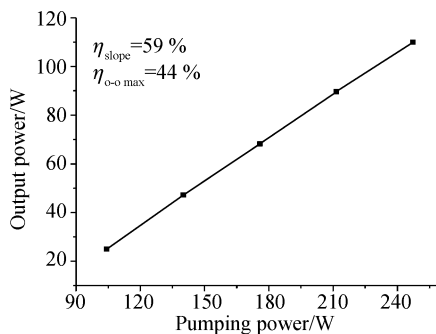


Fig. 5 Output power vs. pumping power

时的光-光转换效率为 44%。斜率效率约为 59%。

图 6 和图 7 分别为用 CCD 测得的 110 W 输出激光在近场和远场的光强分布,图中坐标均为线性坐标,由于这里记录的只是相对值,故单位均为任意单位。在近场分布里,输出激光在沿着稳腔方向上为高斯分布;在远场分布里两个方向上的分布都是

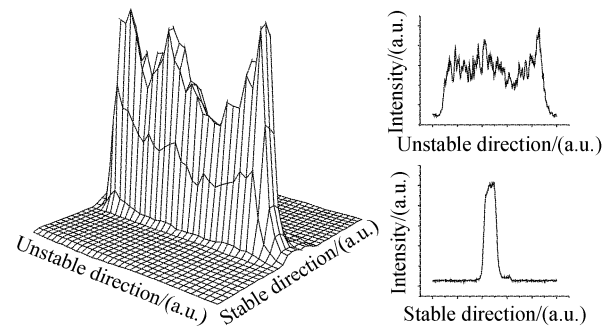


Fig. 6 Intensity distribution of the output beam

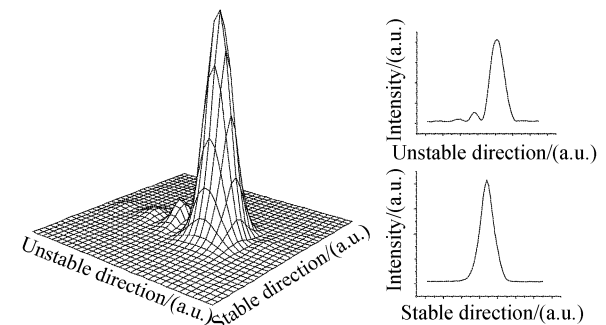


Fig. 7 Intensity distribution in the far-field with side lobes

典型的高斯分布,只是在非稳腔方向上有一系列小旁瓣,这是由输出腔镜的边缘引起的硬边衍射造成的。为了切除旁瓣,进一步提高光束质量,在输出腔镜后又加了一个由透镜和光阑组成的空间滤波器(参见图 8)。经过空间滤波切除旁瓣后的激光远场分布如图 9 所示。

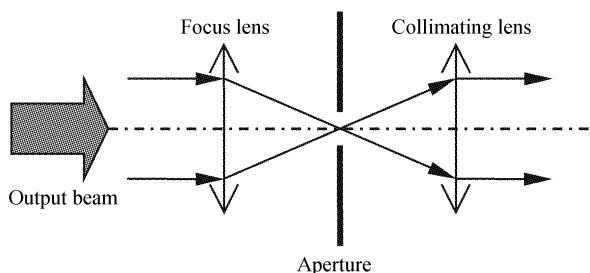


Fig. 8 Illusion of space filtering

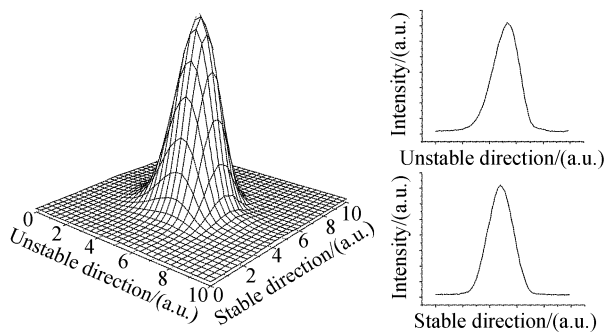


Fig. 9 Intensity distribution in the far-field after spatial filter

我们还采用了文献[7]中的方法,利用一个焦距为  $f$  的透镜及 CCD 相机测量了输出激光的光束质量:通过分别测量物距为  $f$  时像距为  $f$  处像的大小,以及物距为  $2f$  时像距为  $2f$  处像的大小,计算出光束传播因子  $M^2$ 。通过这一方法得出,在 110 W 输出时非稳腔方向上的光束传播因子  $M^2$  为 1.3,在稳腔方向上为 1.5。用 Coherent 的 Mode Master 测量 50 W 输出的激光在整形后的典型光束质量为:非稳腔方向上  $M^2=1.09$ ,稳腔方向上  $M^2=1.2$ 。

**结论** 综上所述我们利用部分端面抽运再配以稳-非稳混合腔的 Nd:YVO<sub>4</sub> 板条激光器这一技术,用腔长约为 80 mm 的短腔获得了 110 W 近衍射极限高光束质量的激光输出,在两个正交方向上的光束质量因子  $M^2$  分别为 1.3 和 1.5,光-光转换效率为 44%,斜效率为 59%。同时,本文还介绍了利用空间滤波器对输出的激光进行整形,整形后的光束质量在 50 W 时的典型值分别为 1.09 和 1.2。

感谢德国 BMBF/DLR 为在 EdgeWave GmbH 进行的合作研究提供资助。

### 参 考 文 献

- 1 Du K, Biesenbach J, Ehrlichmann D *et al.*. Lasers for materials processing: Specifications and trends. *Opt. Quantum Electron.*, 1995, **27**(12):1089~1102
- 2 Rutherford T S, Tulloch W M, Gustafson E K *et al.*. Edge-pumped quasi-three-level slab laser: design and power scaling. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2000, **36**(2):205~219
- 3 Du Keming, Wu Nianle, Xu Jiandong *et al.*. Partially end-pumped Nd:YAG slab laser with a hybrid resonator. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(5):370~372
- 4 Chen Lin, Hou Xia, Lu Yutian. Analog calculation and evaluation of LDA direct side-pump. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(7):825~828 (in Chinese)
- 5 Jin Tianfeng, Yuan Yiqian, Miao Tongqun *et al.*. High efficiency 1.064  $\mu\text{m}$  output in diode pumped Nd:YVO<sub>4</sub> laser. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1996, **16**(5):598~600 (in Chinese)
- 6 Li Jian, He Jingliang, Hou Wei *et al.*. Performance of a laser-diode pumped high efficient Nd:YVO<sub>4</sub> laser. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2000, **20**(4):484~488 (in Chinese)
- 7 Hua Renzhong, Liao Yan, Franjic K *et al.*. A 49.5 W Nd:YVO<sub>4</sub> laser using the disc-anvil configuration, *Advanced solid-state lasers. Technical Digest, Quebec city, Canada, OSA. 2002. TuC1*
- 8 Li Xiaoli, Shi Xiangchun, Shi Peng *et al.*. Temperature effect of Yb:YAG thin disk laser crysal. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **21**(10):1268~1271 (in Chinese)
- 9 Koechner W. *Solid-State Laser Engineering*. 5th rev. and updated ed. Berlin: Springer Press, 1999