

文章编号: 0253-2239(2004)10-1349-4

折返式激光二极管侧抽运 Nd:YAG 激光器

侯 霞 陆雨田 胡企铨

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要: 提出一种明显改善激光二极管侧面直接抽运固体激光器输出光束质量的新型谐振腔——折返式谐振腔, 它由三部分组成: 直角棱镜、全反的腔镜以及耦合输出腔镜, 采用振荡光顺次通过晶体内增益场强区的工作方式。它重叠利用不均匀增益场的对称强区, 提高了晶体增益场和谐振腔基模的重叠度, 达到改善器件输出光束质量和提高效率的目的。通过对受抽运晶体内的增益场分布及腔内振荡光的模拟分析以及实验测试, 验证了这种谐振腔的优势。在此基础上, 研制了采用准连续线阵列激光二极管抽运 Nd:YAG 的折返式激光器。研究比较了在不同类型谐振腔下, 激光器的输出特性。例如: 平-平直腔和平-平折返腔在耦合透过率为 50% 时的输出特性, 其增益场和基模的重叠度由 24% 提高到 53%, 光-光斜效率由的 20.2% 提高到 27.3%。

关键词: 激光器; 谐振腔; 折返式; 侧抽运; 直角棱镜

中图分类号: TN298.1⁺3 文献标识码: A

Diode Side-Pumped Enfolded Cavity Nd:YAG Lasers

Hou Xia Lu Yutian Hu Qiquan

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

(Received 27 June 2003; revised 16 February 2004)

Abstract: A novel cavity for improving the beam quality of diode direct side-pumped Nd:YAG laser was proposed. The enfolded cavity consisted of three parts, a Porro prism, a high-reflectance mirror and a output coupler mirror. It made full use of the symmetry proportion of uneven gain profile to provide better matching between the gain volume and mode volume, so that the better quality beam and the higher optical-optical slope efficiency were obtained. The enfolded cavity was proved to be high effective by the results of experimentation and simulated calculation. For the quasi-CW laser diode side-pumped enfolded Nd:YAG laser, a 27.3% optical-optical slope efficiency was obtained.

Key words: lasers; resonator; enfolded cavity; side-pumped; Porro prism

1 引 言

半导体激光抽运的固体激光器中, 采用矩形截面的增益介质(即所谓方棒), 从一对侧面抽运, 另一对侧面冷却, 是一种特别值得机载、星载激光系统考虑采用的结构。供冷却的侧面可以与热汇紧密接触甚至焊接, 通过传导方式快速散热。传导散热是最快速最高效的散热方式, 特别有利于高稳定性和大功率激光器运转。热汇直接散热不需要水套之类隔

离装置, 在不允许循环水流的空间应用场合具有独特的优越性。空间应用的激光系统多以重复率脉冲方式运转, 方棒的侧面与准连续面列阵激光二极管的光场不难匹配, 激光二极管贴近它就能直接抽运, 虽然均匀性和效率不尽如人意, 但是简单合算而且紧凑可靠。激光二极管面阵整形集光的光学系统结构复杂且损耗可观, 省却后更容易实现小型轻量化。但是, 侧面直接抽运方棒的结构有一大缺点: 输出激光的模式不好。由于进入增益介质的抽运光首先被它的边缘部分吸收了大部分能量, 因此从一对侧面直接抽运的方棒中, 增益场必定存在两个强区, 甚至在中心部分出现空洞, 这对基模振荡极为不利。降

E-mail: hxlf@163.net

收稿日期: 2003-06-27; 收到修改稿日期: 2004-02-16

低激光晶体的吸收系数或拉远抽运源的距离能改善这种情况^[1],但是效率受损太大。减小激光晶体的横向尺寸将使强区靠拢,但是最小尺寸有限度。设计特殊的谐振腔或使用掺杂浓度特殊分布的激光棒可能补偿振荡模式,但是过于复杂。

我们用直角棱镜构成折返式谐振腔,使振荡光先后穿过激光介质内的两个增益强区,结果明显地改善了输出光束质量,提高了基模光-光效率。

2 实验装置

折返式激光器的结构示意图见图 1。平面镜 M_1 、 M_2 和直角棱镜组成了折返式谐振腔。其中棱镜斜面镀 1064 nm 增透膜,另两个直角面镀去退偏介质膜,直角棱线垂直于抽运方向放置。 M_1 为半圆状平板全反镜,镀 1064 nm 全反膜。 M_2 为耦合输出镜,透过率为 $T=50\%$ 。采用常用的激光晶体 Nd:YAG, Nd 掺杂摩尔分数为 1%,为了能更容易的实现光束折返,充分利用抽运光,有意选取较大的晶体尺寸,4 mm×6 mm×55 mm。采用两排激光二极管直接侧抽运晶体,晶体受抽运面为 4 mm×55 mm。每排激光二极管由 5 个准连续面列阵激光二极管组成,发光区尺寸为 1.6 mm×10 mm,每个准连续面列阵激光二极管由 5 条发光线列封装而成,垂直于结平面方向的发散角半宽为 45°。晶体的下表面 6 mm×55 mm 用于冷却。激光二极管和晶体采用半导体控温。

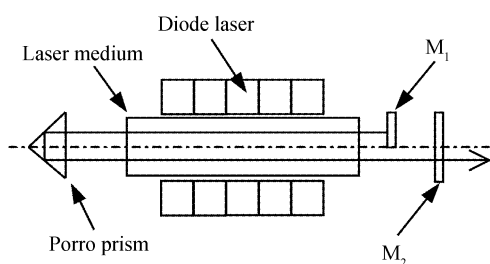


Fig. 1 Configuration of enfolded cavity

3 谐振腔设计原理

一对激光二极管侧面抽运晶体时,由于抽运光进入晶体后成指数衰减,在晶体两侧形成强区,整个晶体对抽运光的吸收集中在一个长椭圆区域内。图 2 是我们针对实验中采用的准连续面列阵激光二极管侧抽运方棒晶体形成的增益场分布的模拟结果^[1~4],单位为任意单位。

增益场的分布直接影响激光器的输出光束质

量。对于上述增益场,采用一般的谐振腔会得到一个椭圆截面的多模输出。

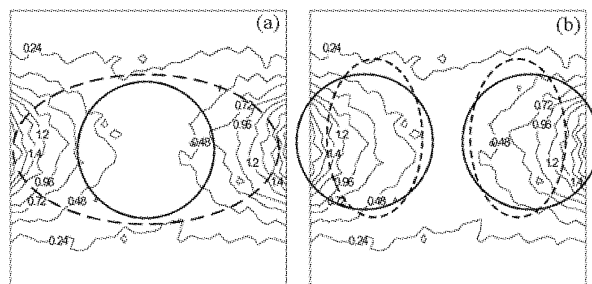


Fig. 2 Calculated gain profile showing normalized intensity contours (a) and sketch map of the overlap between the gain volume and the single mode (b)

从增益场的分布可以大概估计出增益场和谐振腔基模的重叠程度,相应也就可以估计出激光器基模和多模输出的比值,从侧面描述了多模激光器的输出光束模式的好坏。文献[5]定义激光器基模输出和多模输出的能量比为

$$\eta_{\text{TEM}_{00}} = \frac{E_{\text{TEM}_{00}}}{E_{\text{mm}}} = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} dx \int_{-\infty}^{+\infty} g(x, y) m(x, y) dy}{\int_{-\infty}^{+\infty} dx \int_{-\infty}^{+\infty} g^2(x, y) dy}, \quad (1)$$

其中 E_{mm} 为多模输出能量, $E_{\text{TEM}_{00}}$ 为基模输出能量。 $g(x, y)$ 和 $m(x, y)$ 为归一化的增益场分布和基模分布。对于一个椭圆的增益场分布和圆形的基模分布而言,令 x_0, y_0 为增益椭圆半径, ω_0 为基模半径。假设增益场和基模都为高斯对称分布,则当 $\omega_0 \leq (x_0, y_0)_{\min}$ 时

$$\eta_{\text{TEM}_{00}} = \frac{2}{\{[1 + (x_0/\omega_0)^2][1 + (y_0/\omega_0)^2]\}^{1/2}}, \quad (2)$$

当 $\omega_0 > (x_0, y_0)_{\min}, \omega_i = (x_0, y_0)_{\max}$

$$\eta_{\text{TEM}_{00}} = \frac{2}{\{2[1 + (\omega_i/\omega_0)^2]\}^{1/2}}. \quad (3)$$

实际增益场的分布,尤其是在采用激光二极管侧抽运的方式下,与高斯或对称分布是有差距的。但这样的假设有助于简化问题。通过简单的估算,了解激光器的输出情况。可见为了改善输出光束质量,必须提高增益场和基模的重叠度。

为提高激光二极管侧面抽运晶体的增益场和基模的重叠程度,我们考虑了很多方法。在先前的工作中我们采取减小 Nd:YAG 晶体的吸收系数,或增加激光二极管距晶体的距离^[1],得到了较为理想的

输出,但是这两种方法都受制于抽运能量应被充分利用的先决条件。增大吸收系数,同时减小晶体的宽度也能使增益强区靠拢。但是要保证足够宽的冷却面积,晶体的宽度不能无限制的减小;使用浓度特殊掺杂分布的晶体,令晶体在棒边缘处对抽运光的吸收减弱^[6],使增益强区向棒中心区域移动;采用特殊的耦合输出镜^[7,8],控制不同区域的输出透过率。这些方法都能取得预定的效果,但需要特殊的工艺,增加了实际应用的难度。也有人提出使增益场其中的一个强区与基模重合,以牺牲效率为代价,得到较好的光束模式。所有这些都是通过改善增益场的均匀性,来解决问题。本文介绍用直角棱镜,构成折返式谐振腔,重叠利用不均匀增益场中对称强区,

提高增益场和基模的重叠度。从另一个角度,利用增益场的不均匀性来解决问题。

4 实验验证

图 2 中,我们在模拟的增益场分布上画出了增益场和谐振腔基模的重叠区。实线表示基模园,而虚线则大致的给出了增益场的强区范围。通过实验实际估测了晶体增益场的尺寸,模拟计算了谐振腔的空腔振荡输出。图 3 是模拟的近场衍射光斑。计算参量为:腔长 300 mm,腔镜 $\phi 20$ mm,假设增益场为对称均匀分布;对于折返腔,两个强区的截面尺寸取 $2\text{ mm} \times 2\text{ mm}$;平平腔,增益场截面尺寸取 $2\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 。

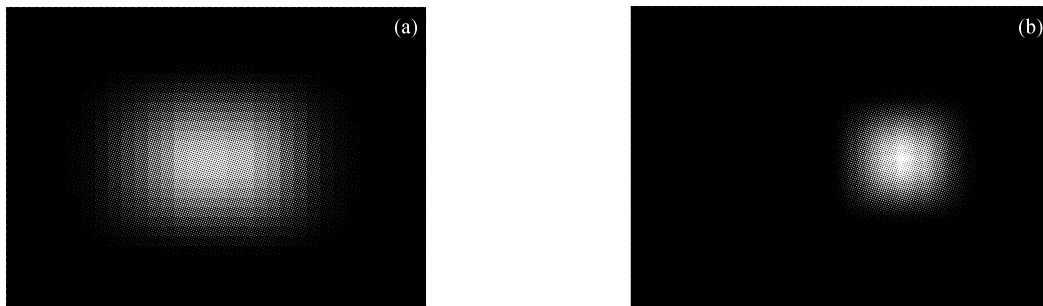


Fig. 3 The simulated near-field distribution. (a) flat-flat cavity, (b) enfolded cavity

图 2(a)是普通平平腔的情况,谐振腔基模振荡区为晶体的中心区域。图 3(a)给出了模拟的近场衍射光斑。对应的图 4(a)则是用 CCD 拍摄的实际激光输出的近场衍射光斑(为避免图像灰度出现饱和,拍摄时,在 CCD 镜头前加衰减片),光斑质量不好,其中光斑的两个强区对应于晶体边缘略靠中的区域。此时增益椭圆半径为 1 mm 和 2.5 mm。取基模半径为 0.6 mm(典型的半共心谐振腔,腔长为 90 cm,全反镜的曲率半径为 1 m,基模半径约为 0.6 mm),则基模与多模的输出比仅为 24%。图 2(b)则是采用折返式谐振腔的情况,谐振腔基模振荡区为晶体的边缘区域。

模拟的衍射光斑见图 3(b)。图 4(b)则是拍摄的实际的近场衍射光斑,光束质量明显得到了改善。此时增益椭圆半径为 1 mm 和 1 mm,基模与多模的输出比达到 53%,是普通平平腔的 2 倍。可见折返式谐振腔结构大大提高了增益场和谐振腔基模的重叠度,改善了输出光束质量。同时也应看到,为了提高基模和多模的输出比,我们还应减小增益场的尺寸。对于不经整形的面列阵激光二极管直接侧面抽运方式,本身发光尺寸就达 $1.6\text{ mm} \times 10\text{ mm}$,基模和多模的输出比理论上最大也仅为 72%。

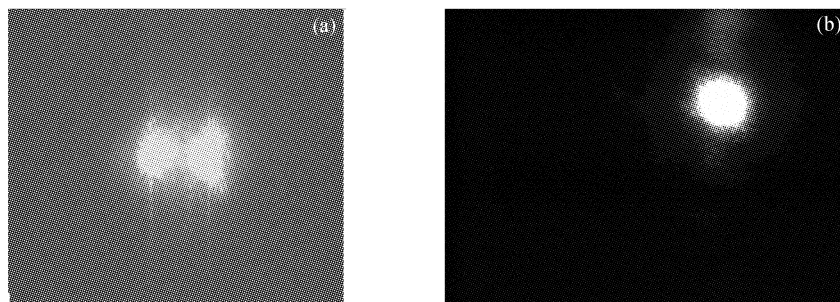


Fig. 4 The near-field distribution captured by CCD. (a) flat-flat cavity, (b) enfolded cavity

图 5 比较了折返式和平平谐振腔的输出情况。器件的光光斜效率由 20.2% 提高到 27.3% 左右。

折返式谐振腔在注入 480 mJ 时,输出 113 mJ,输出光束质量得到了明显改善。

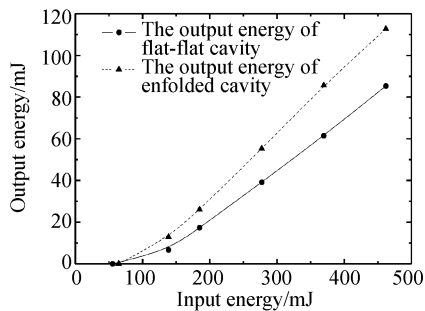


Fig. 5 Output energy obtained for each configuration investigated as a function of diode pump energy

5 结果讨论

相比平平腔,折返式谐振腔增加了额外的腔内衍射损耗。损耗主要来源于两部分,一是棱镜的角度偏差;二是半圆状全反片 M_1 ,类似于一个硬边光阑。

在折返式谐振腔的试验中,采用的直角棱镜角度偏差为 $\pm 2'$,直角面镀介质膜,但介质膜的尺寸小于直角面,在直角棱线附近,刚好是膜层的边缘处,相当于增加了棱线宽。采用的半反片过厚,达到 5 mm。这些都相应增加了腔内损耗。实验结果与预期结果存在一定偏差。通过对空腔衍射损耗的模拟计算, M_1 (硬边光阑)的引入,约增加 3% 的单程衍射损耗。为减少腔内的损耗,在后继的实验中应提高棱镜加工要求,要求直角角度偏差为 $\pm 5''$,棱线宽小于 $5 \mu\text{m}$ 。将 M_1 用半边镀膜的镜片替代,将硬边光阑改为软边光阑,有利于减少衍射损耗。

虽然实验中腔内损耗加大,但振荡光先后经过晶体的两个主要强区,谐振腔基模与增益场得到更好地匹配,整个激光器效率提高,激光器的输出和光斑质量仍好于采用普通谐振腔。

采用折返式谐振腔时,直角棱镜的位置应尽可能使晶体内强区经过折返后相互重叠,充分利用强区的能量。考虑到通常晶体两侧的抽运强度存在差异,因此直角棱镜应有平移调节。由于直角棱镜具

有自准直性,棱镜绕棱线的转角不需要细调。

结论 文中分析了直接侧面抽运方棒晶体的增益场分布特点,得出晶体两侧存在对称强区,整个晶体对抽运光的吸收集中在一个长椭圆区域的结论。采用简单易行的折返式谐振腔,重叠利用不均匀增益场的对称强区,能明显改善面列阵激光二极管直接侧面抽运固体激光器的输出光束质量,提高光-光效率。这种激光器结构简单,适宜采用传导方式冷却,整机紧凑,高效,体积小,重量轻,特别适用于机载、星载的要求。

参 考 文 献

- 1 Chen Lin, Hou Xia, Lu yutian. The method of LDA side-pumping; Analog calculation and evaluation. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(7): 825~828 (in Chinese)
- 2 Meng Junqing, Chen Weibiao, Hou Xia *et al.*. Comparison of different side-pumped configurations for high power laser diode pumped solid-state laser. *Chin Opt. Lett.*, 2003, **1**(9): 538~540
- 3 Zhang Hua, Xiu Shixiang, Fan Dianyuan. Pumping energy distribution in rod amplifier calculated with the Monte Carlo method. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1997, **17**(12): 1601~1608 (in Chinese)
- 4 Zhao Hong, Jiang Dongsheng, Wang Jianjun *et al.*. Gain distribution characteristics in working medium side-pumped by diode bars. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2003, **23**(1): 58~62 (in Chinese)
- 5 Marshall L R, Kaz A, Burnham R L. Highly efficient TEM₀₀ operation of transversely diode-pumped Nd:YAG lasers. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(3): 186~188
- 6 Lucianeti A, Graf T, Weber R *et al.*. Thermal properties of transversely pumped composite rods with a Nd-doped core. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2000, **36**(2): 220~227
- 7 Nathalie McCarthy, Pierre Lavigne. Optical resonators with Gaussian reflectivity mirrors: Output beam characteristics. *Appl. Opt.*, 1984, **24**: 3845
- 8 Agnieszka Mossakowska-Wyszyńska, Piotr Wiltoński, Pawel Szczepański. Relaxation oscillations in a laser with a Gaussian mirror. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(9): 1668~1676