

# 激光二极管端面抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体连续 输出板条激光器研究

张恒利<sup>1)</sup> 闫莹<sup>1)</sup> 杜克明<sup>2)</sup>

1) 北京理工大学信息科学与技术学院, 北京 100081)

2) EdgeWave GmbH, Steinbachstr. 15, 52074 Aachen, Germany)

(2007 年 12 月 3 日收到, 2008 年 2 月 23 日收到修改稿)

报道了利用激光二极管阵列端面抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 混合腔板条激光器连续波输出的实验结果, 获得近衍射极限的 60 W 连续激光输出. 实验证明两种晶体输出功率相当, 低掺杂浓度的 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体更有利于得到近衍射极限的高功率输出, 但同时冷却水温度的变化也较敏感.

关键词: 激光二极管端面抽运, 板条激光器, 混合腔

PACC: 4255R

## 1. 引言

近年来, 由于半导体激光二极管亮度的不断提高, 高功率全固态激光器得到迅速发展. 对于传统的棒状增益介质全固态激光器, 热致双折射、热透镜和晶体的破裂极限等因素严重影响了激光光束质量, 限制了激光器输出功率的提高. 采用激光二极管阵列部分端面抽运混合腔板条激光器是获得高功率、高效率、高光束质量激光输出的一个有效途径<sup>[1-4]</sup>, 与其他类型的全固态激光器相比较, 它具有以下优势: 1) 板条晶体两个大面通过传导进行冷却, 冷却效果更好; 2) 采用端面抽运方式, 抽运光和振荡光模式匹配更好; 3) 利用混合腔结构可以获得光束质量近衍射极限的激光输出. 与以往 Zig-Zag 板条激光器振荡光经多次全反射通过激光晶体相比, 在部分端面抽运板条激光器中, 振荡光直线通过增益介质, 因此只需对激光晶体的两个表面进行抛光, 降低了光学加工的难度. 另外, 由于非稳腔的光束特性与增益介质在宽度方向的尺寸无关, 因此可以通过增加增益介质的宽度来提高激光器输出功率, 有利于激光器的升级. 在常用的激光增益介质中, Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体由于具有较大的发射截面, 较宽的吸收谱线和良好的偏振输出特性而备受青睐, 但同时因其具有较小的热传导系数和较低的破裂阈值而多应用于中小功率激光器<sup>[5]</sup>.

我们已经对用激光二极管阵列部分端面抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 混合腔板条激光器进行了一些实验研究<sup>[6]</sup>, 本文报道了对两种不同掺杂浓度的 Nd:YVO<sub>4</sub> 进行研究的实验结果, 两块板条晶体的掺杂浓度分别为 0.5% 和 0.27%. 实验结果表明, 采用同样的抽运条件和谐振腔, 最大输出功率分别为 62.5W 和 59.3W, 相差很小, 而低掺杂晶体的输出光束质量更好, 但其输出功率对冷却水的温度变化也较敏感.

## 2. 实验装置

图 1 为端面抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 板条激光器的实验装置示意图. 4 个二极管阵列组成的二极管堆栈作为抽运源, 通过恒温水循环系统对其进行温度控制. 利用微透镜对激光二极管阵列输出快方向进行准直, 通过柱面镜聚焦, 耦合到矩形波导中, 使光在激光二极管慢方向上均匀混合, 从而在晶体处获得一条近似均匀的尺寸为 0.4 mm × 12 mm 的抽运线. Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的尺寸为 12 mm × 10 mm × 1 mm, 两个大面 (12 mm × 10 mm) 作为冷却面, 通过金属钎焊接到热沉上.

在  $x-z$  平面 (如图 1 所示) 中, 激光器具有离轴正支共焦非稳腔结构, 输入和输出球面镜的曲率半径分别为 -250 mm 和 500 mm, 放大系数为  $M = 2$ , 输出耦合系数为  $1 - 1/M = 50%$ <sup>[7]</sup>. 在  $y-z$  平面上, 激光器具有平-平稳定腔结构, 考虑该方向存在热透镜

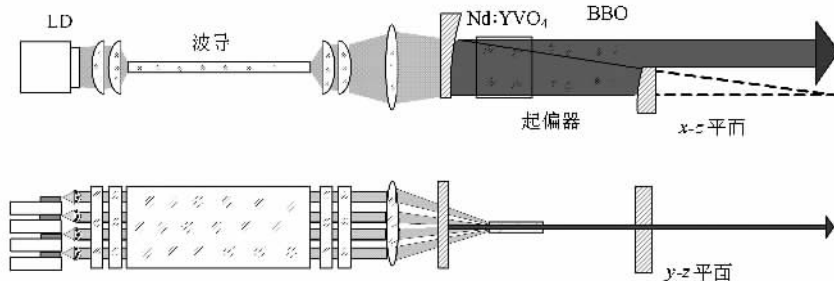


图1 激光二极管端面抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体连续输出板条激光器实验装置示意图

效应,因此该方向为稳定腔.几何腔长约为 67.5 mm.

### 3. 实验结果与讨论

本实验中采用了掺杂浓度分别为 0.5% 和 0.27% 的两块 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体.图 2 是采用掺杂浓度为 0.5% 的晶体实验所得的激光输出功率变化图.方形点表示抽运光起始点在阈值附近的情况下输出光功率随输入功率的变化情况;圆点表示抽运光起始点在最大抽运功率附近时输出光功率随输入功率的变化情况.在保持激光器其余参数和结构不变的基础上,通过改变抽运源的电流来提高和降低抽运光功率,获得不同抽运功率下的输出功率值.通过比较两条曲线,可以看出在输出功率上有一个明显的滞后现象.造成这一现象的主要原因是抽运光在增益介质  $y-z$  面上的不均匀性所导致的相位畸变.抽运光从阈值附近开始变化时,实验测得阈值和最大输出功率分别为 19 W 和 56 W,从最大抽运功率附近开始变化时,测得阈值和最大输出功率分别为 47.7 W 和 62.5 W.对于掺杂浓度为 0.27% 的 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光晶体也得到了类似的滞后现象.

图 3 给出了掺杂浓度为 0.27% Nd:YVO<sub>4</sub> 激光晶体的输出特性.同时还给出了抽运光功率从最大抽运功率开始变化时,两种掺杂浓度的激光晶体输出特性的比较.在抽运功率为 176 W 时,最大输出功率分别为 62.5 W 和 59.3 W,其斜效率分别为 51.5% 和 51.7%,其对应的由二极管输出的抽运光到输出激光的光-光转化效率分别为 35.5% 和 33.7%.对于掺杂浓度为 0.27% 的晶体其阈值为 51.6 W,高于掺杂浓度为 0.5% 的 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体.

图 4 是利用 CCD 测量的输出光束近场光强分布图.在非稳腔方向输出光束的尺寸约为 5.7 mm.

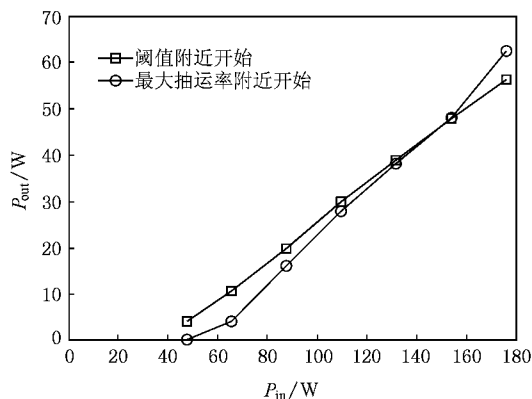


图2 掺杂浓度为 0.5% 板条晶体输出功率随抽运功率的变化关系

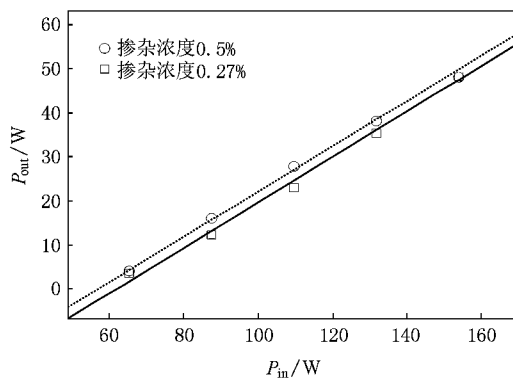


图3 Nd:YVO<sub>4</sub> 板条激光器输出功率随抽运功率的变化关系

为了方便调整,我们将光轴从 Nd:YVO<sub>4</sub> 边缘移至晶体内部约 0.5 mm 处,因此在输出镜处非稳腔方向的光束尺寸略小于 6 mm.图 5 是在抽运功率为 176 W, Nd:YVO<sub>4</sub> 掺杂浓度为 0.27% 的情况下,输出光束在  $y-z$  方向经过一系列棱镜被放大 12 倍后的远场光强分布图.与端面抽运棒状激光器类似,稳腔方向获得了类似高斯线型的光强分布,在非稳腔方向,由于输出耦合镜的边缘衍射,输出光束出现光强极

大值,并伴随有旁瓣.我们利用与文献[8]中相同的方法测量了输出激光的光束质量.采用一个焦距为  $f = 300\text{ mm}$  的透镜对衰减后的输出光束进行聚焦成像.通过测量激光光束在一倍焦距和二倍焦距处(物距分别为一倍焦距和二倍焦距)的光斑尺寸,结合高斯光束的传播规律,可以计算出输出耦合镜处的光斑尺寸、发散角和  $M^2$  因子.

度(0.5%)的  $\text{Nd:YVO}_4$  晶体具有相对较高的转化效率,但低掺杂浓度(0.27%)的  $\text{Nd:YVO}_4$  晶体更能够在高功率输出时获得近衍射极限的激光输出.

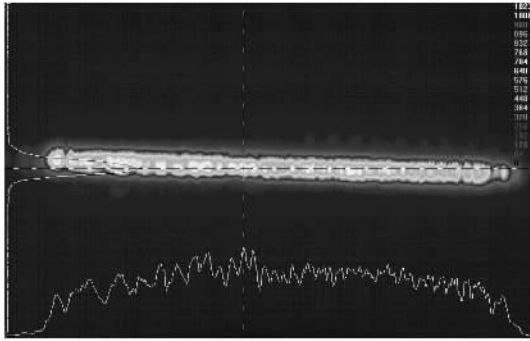


图 4 输出光束近场光强分布图

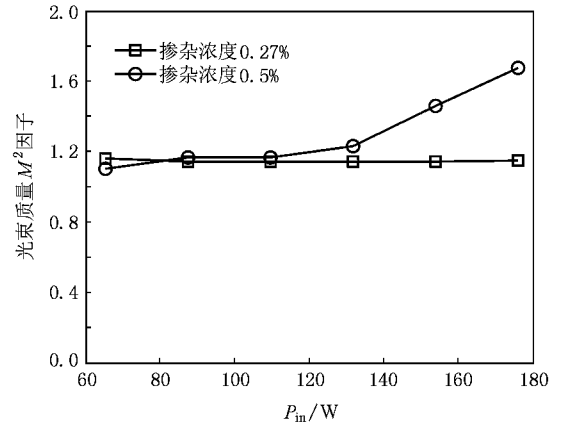


图 6  $M^2$  因子随抽运功率的变化关系

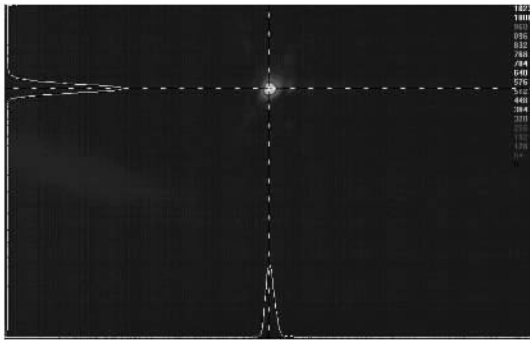


图 5  $y-z$  平面扩束 12 倍后远场光斑强度分布

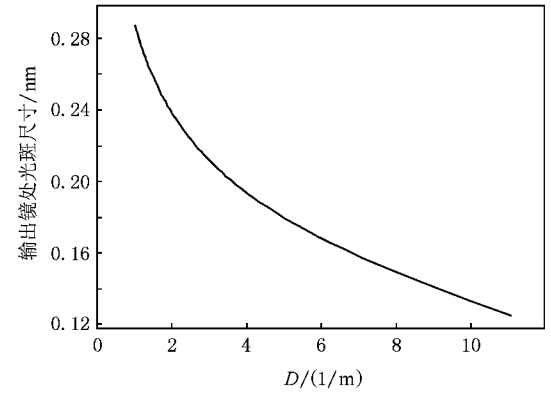


图 7 输出镜处光斑尺寸与热透镜光焦度的变化关系

图 6 给出了不同抽运功率下两种掺杂浓度晶体输出光束在稳定腔方向  $M^2$  因子的测量值.从图 6 中可以看到对于掺杂浓度为 0.5% 的  $\text{Nd:YVO}_4$  晶体来说,当抽运光功率小于 110 W 即输出功率小于 40 W 时,  $M^2$  因子小于 1.2. 当抽运光功率增加到 130 W 以上时,  $M^2$  因子开始高于 1.2 并迅速增加,在抽运光功率为 176 W 时,  $M^2$  因子值高于 1.6. 此时激光器不再是单横模运转,低阶模式开始形成振荡,使得光束质量下降.对于掺杂浓度为 0.27% 的  $\text{Nd:YVO}_4$  晶体,在整个抽运光的功率范围内,输出光束稳定腔方向的  $M^2$  因子一直保持在 1.2 以下.对于两种掺杂浓度的晶体在整个抽运功率的变化范围内,在非稳腔方向( $x-z$  平面)输出光束的  $M^2$  因子都小于 1.3. 根据上述实验结果可以看出,尽管高掺杂浓

对于部分端面抽运板条激光器,在稳腔方向与端面抽运棒状激光器相同,在  $y-z$  平面内,晶体所形成的热透镜保证平-平腔的稳定性.假设激光器基模运转,透镜位于平-平腔的两个平面镜之间,透镜与输入镜的距离约为 5 mm,与输出镜的距离为 62.5 mm,通过 ABCD 定律和输出光束束腰尺寸可以计算出透镜的焦距.图 7 给出了输出镜处光斑尺寸与热透镜光焦度  $D(1/f_{\text{thermal}})$  之间的关系.图 8 给出了热透镜光焦度与抽运光功率的关系,并进行了线性拟合.从图 8 中可以看出抽运光功率与热透镜光焦度成正比,即  $D_{\text{thermal}} \propto P_{in}$ . 根据线性拟合的结果,两种浓度的晶体的热透镜焦距与抽运功率的函数关系分别为  $D_{0.5\%} = 0.03P_{in} - 0.07$ ,  $D_{0.27\%} = 0.021P_{in} + 0.163$ ,可以看出掺杂浓度为 0.5% 的  $\text{Nd:YVO}_4$  晶体

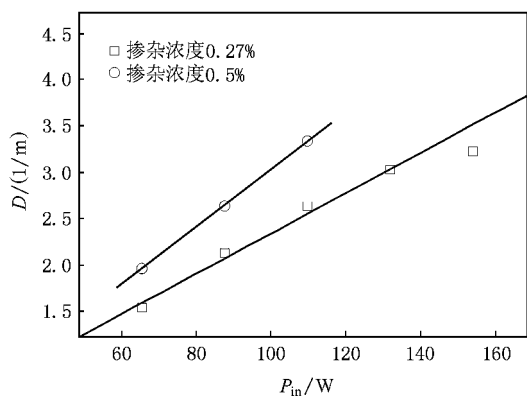


图8 热透镜光焦度随抽运功率的变化关系

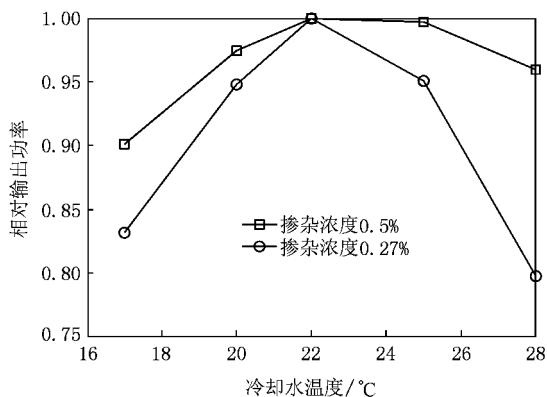


图9 相对输出功率随激光二极管冷却水温度的变化关系

热透镜效应更加明显.

激光器的输出功率同时还与冷却水温度具有一定的关系.我们在一定的抽运功率下对水温在 17—28℃范围内输出功率的变化情况进行了测量,实验结果如图 9 所示.从图中可以看出对应最高输出功率的最佳冷却水温为 22℃,温度变化对低掺杂浓度(0.27%)Nd:YVO<sub>4</sub>晶体输出功率的影响大于高掺杂浓度(0.5%)的晶体,此实验结果与 Chen 等人<sup>[9]</sup>得到的结论类似.这是由于低浓度的 Nd:YVO<sub>4</sub>晶体对于二极管发射谱线的漂移更加敏感造成的.

## 4. 结 论

本文介绍了利用部分端面抽运板条激光器结合混合腔结构,采用掺杂浓度为 0.5%和 0.27%的 Nd:YVO<sub>4</sub>板条晶体,分别获得了功率为 62.5 W ( $M^2_{\text{stable}} = 1.6$ ,  $M^2_{\text{unstable}} < 1.3$ )和 59.3 W ( $M^2_{\text{stable}} = 1.17$ ,  $M^2_{\text{unstable}} < 1.3$ )的 1.06 μm 连续激光输出,相应从二极管到输出激光的光-光转化效率分别为 33.7%和 35.5%.实验证明,与高掺杂浓度的晶体相比,低掺杂浓度的 Nd:YVO<sub>4</sub>晶体更利于在保证输出光束质量前提下进行功率升级,但同时其输出功率对冷却水温度的变化也更为敏感.

[ 1 ] Li Y, Chi H L 1994 *Appl. Phys.* **75** 1286

[ 2 ] Du K M, Wu N L, Xu J D, Gieseckus J, Loosen P, Poprawe R 1998 *Opt. Lett.* **23** 370

[ 3 ] Du K M, Liao Y, Loosen P 1997 *Opt. Commun.* **140** 53

[ 4 ] Schnitzler C, Höfer M, Lutmann J, Hoffmann D, Poprawe R 2002 *Conference on lasers and electro-optics Long Beach California postdeadline papers CPDC2-1*

[ 5 ] Feng Y, Song F, Zhao L J *et al* 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 335 [ in Chinese ] 冯 衍、宋 峰、赵丽娟等 2001 物理学报 **50** 335 ]

[ 6 ] Shi P, Li D J, Zhang H L 2004 *Opt. Commun.* **229** 349

[ 7 ] Koehner W 1999 *Solid-state laser engineering fifth revised and updated edition* springer.

[ 8 ] Zhang H L, Shi P, Li D J 2003 *Appl. Opt.* **42** 1681

[ 9 ] Chen Y F, Lan Y P, Wang S C 2000 *Appl. Phys. B* **71** 827

# Efficient diode stack end-pumped continuous-wave Nd:YVO<sub>4</sub> slab lasers

Zhang Heng-Li<sup>1)</sup> Yan Ying<sup>1)</sup> Du Ke-Ming<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> *School of Information Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China*

<sup>2)</sup> *EdgeWave GmbH, Steinbachstr. 15, 52074 Aachen, Germany*

(Received 3 December 2007; revised manuscript received 23 February 2008)

## Abstract

Efficient diode stack end-pumped slab lasers with a hybrid cavity were demonstrated. About 60 W of near-diffraction-limited output was obtained with Nd:YVO<sub>4</sub> slab crystals. The lower doped Nd:YVO<sub>4</sub> crystal shows the possibility of further power scaling with near-diffraction-limited output but it also increases the sensitivity of the wavelength to the temperature of the cooling water.

**Keywords** : diode-end-pumped , slab laser , hybrid cavity

**PACC** : 4255R