

端面泵浦双 Nd:YVO₄ 激光器中热效应对腔稳定性的影响

李 隆^{1,2} 张 伟¹ 田来科¹ 白晋涛¹ 侯 洵^{1,2,3}

(1 西北大学光子学与光子技术研究所, 西北大学光电子技术省级重点开放实验室, 西安 710069)

(2 西安交通大学电子与信息工程学院, 西安 710049)

(3 中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学技术国家重点实验室, 西安 710068)

摘 要 利用多个激光晶体串接方式可以提高固体激光器的输出功率. 发展双 Nd:YVO₄ 晶体激光器, 将晶体的端面镀膜作为谐振腔的端面镜, 构成了平行平面谐振腔. 对平行平面谐振腔的等效腔进行了理论分析, 结果表明激光晶体吸收泵浦光产生的热透镜效应对保持腔的稳定性起到了重要的作用. 在国内首次进行了双端泵浦双 Nd:YVO₄ 激光器的实验研究, 在抽运功率为 20.74 W 时获得了 11 W 的 1064 nm TEM₀₀ 模激光输出, 其光-光转化效率约为 53%. 并且对于不同掺杂浓度下的实验结果进行了讨论.

关键词 双 Nd:YVO₄ 激光器; 热透镜效应; 等效腔; 稳定性分析

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A

0 引言

激光二极管(LD)泵浦的全固态激光器具有体积小、光束质量好、使用寿命长、转换效率高、光束质量好等优点, 引起了人们的广泛重视, 并被应用于许多领域. 在适于激光二极管泵浦的众多激光晶体中, Nd:YVO₄ 晶体因在 1064 nm 处的受激发射截面大, 在 808 nm 处的吸收系数高, 以及吸收谱带宽等参数均优于其它现有的晶体材料, 而倍受人们的关注^[1].

发展工业应用的高功率固体激光器是目前研究的热点. 利用多棒串接或放大是提高固体激光器输出功率的最普遍的方法之一. 多棒串接实际上是光束相干合成的一种技术方案, 其优点是输出功率可与棒数成比例的增加^[2], 获得更大的模体积^[3,4]和高的光-光转换效率. 研究也同时表明, 采用平行平面腔结构, 整个系统可以得到与棒数成比例的激光输出, 且不会降低光束质量, 将两根或多根 Nd:YAG 晶体串接起来使用, 增加了工作物质的长度, 获得了更大的模体积, 从而得到了高功率的输出^[5].

本文对于双 Nd:YVO₄ 晶体端面构成的平行平面腔在器件运转时等效腔的稳定结构进行了理论探讨, 并在实验中得到了证实. 晶体吸收泵浦光产生的热透镜对于激光器的稳定起到了重要的作用, 使得等效腔迅速达到其几何的稳定腔^[6], 在发展输出功率为数百瓦至数千瓦量级的高功率固体激光器

中, 常采用多棒串接的技术方案.

1 理论分析和数值计算

平面平行腔具有法布里-珀罗干涉仪的构型, 腔的特点是可以很好的利用激活材料的体积, 但是, 对于微小的腔面不平行都非常的灵敏^[7]. 同时, 这种开放式谐振腔具有选模作用, 表现在接近腔轴线传播的行波叠加形成的模损耗不会很大; 而沿偏离腔轴方向传播的行波, 将很容易从腔镜边缘逃逸出去, 并且它们叠加得到的模式有很大的损耗. 平面谐振腔既可以提供反馈, 又具有较强的模式选择能力, 并且通过受激辐射产生强的相干光. 图 1 为双端泵浦双棒串接 Nd:YVO₄ 实验装置图.

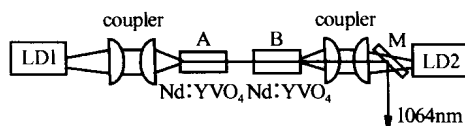


图 1 双棒串接 Nd:YVO₄ 实验装置图

Fig. 1 Schematic diagram of two rod series connection Nd:YVO₄ lasers

端面泵浦固体激光器中, 激光增益介质内的热聚焦作用在一级近似下可视为焦距为 f 的薄透镜, 其表达式为^[8]

$$f = \left[\frac{\pi K_c \omega_p^2}{P_{ph} (dn/dT)} \right] \left[\frac{1}{1 - \exp(-al)} \right] \quad (1)$$

式中 K_c 为热传导系数; ω_p 为泵浦光光斑半径; P_{ph} 为引起热效应的泵浦功率(约占总功率的 20%); dn/dT 为热光系数; α 为吸收系数; l 为激光晶体长度. 对于掺杂浓度为 0.5% 的 Nd:YVO₄ 晶体 $K_c = 0.0523 \text{ W} \cdot (\text{K} \cdot \text{cm})^{-1}$, α 为 14.8 cm^{-1} , $dn/dT =$

$3.0 \times 10^{-6} / \text{K}$, l 为 9 mm ^[6]. 同时, 实际测量了^[9] Nd:YVO₄ 晶体在泵浦光为 12 W 左右时, 激光晶体的热透镜的焦距范围为 $14 \sim 16 \text{ cm}$.

以激光晶体 A 和晶体 B 的外端面镀膜作为双 Nd:YVO₄ 激光器平面平行腔的腔镜, 考虑激光晶体的热透镜效应, 谐振腔的等效腔结构如图 2 所示.

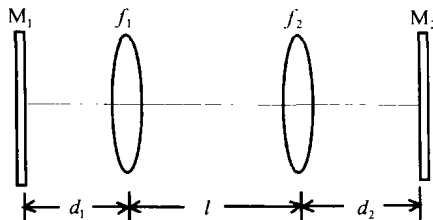


图 2 谐振腔的热透镜等效图

Fig.2 Thermal lens equivalent diagram of resonant cavity

图中 d_1 和 d_2 分别为热透镜焦距到晶体端面的距离, l 为两个激光晶体热透镜焦距之间的距离.

由于双端泵浦的两个半导体激光器的输出功率不可能做到完全一致, 因而导致两个激光晶体的热透镜焦距有所差异. 设两激光晶体的热焦距分别为 f_1 和 f_2 , 以激光晶体的镀膜端面 M_1 为参考面, 则谐振腔内的往返矩阵为

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & d_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & d_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & d_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & d_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中的 d_1 和 d_2 等于所使用的激光晶体长度的一半距离, l 为两个激光晶体热透镜焦距间的距离.

谐振腔的稳定条件为

$$\left| \frac{A+D}{2} \right| \leq 1 \quad (3)$$

根据上述条件, 用计算机处理有关数据, 研究热透镜效应存在时, 谐振腔稳定条件下各个参数变化的范围.

图 3 为两个泵浦源输出功率相同, 即激光晶体产生的热透镜焦距相同条件下, 在稳定条件范围内晶体之间距离的变化图. 图中纵坐标为计算所设定

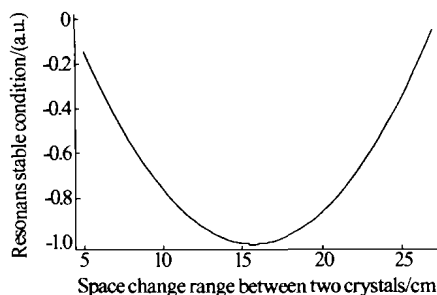


图 3 稳定条件下晶体间距的变化范围

Fig.3 Space change range under stable condition

的稳定范围在 $-1 \sim 0$ 之间, 横坐标为两晶体之间的距离. 设定两个激光晶体的热透镜焦距为 14 cm 时, 两个激光晶体热透镜焦距之间的距离 l 在 $5 \sim 27 \text{ cm}$ 之间变化时, 谐振腔均满足腔的稳定条件, 若 l 的距离超出此范围, 则谐振腔处于非稳定条件, 并且这一结果也与腔设计软件给出的范围相符合.

泵浦源输出功率改变直接引起晶体热透镜焦距的变化. 在晶体热透镜焦距间距离 l 给定 ($l = 8.4 \text{ cm}$), 研究两晶体具有不同热透镜焦距时, 对于腔稳定性的影响, 如图 4.

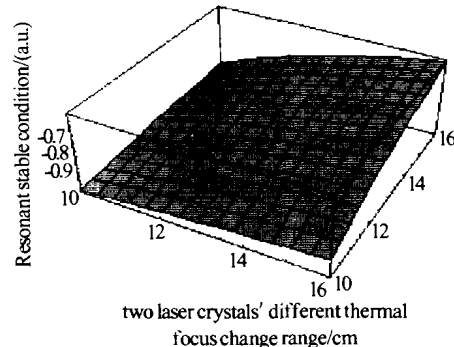


图 4 稳定条件下两个激光晶体热焦距的变化范围

Fig.4 Two crystals' thermal focal distance change range under stable condition

图为在平行平面腔处于稳定条件下, 两个激光晶体具有的不同热焦距 f_1 、 f_2 的变化范围. 此图说明只要有一个泵浦源工作, 在单个激光晶体中产生的热透镜效应便可使双 Nd:YVO₄ 激光器的等效腔满足谐振腔的稳定条件. 充分说明了温度引起晶体的热透镜效应建构了平行平面腔的稳定工作区.

图 5 为平行平面腔的两个激光晶体外端面的距离为 10 cm 时, 腔内子午面和弧矢面光斑的尺寸大小随腔长的距离变化关系图. 结果表明, 在谐振腔内光束的子午面和弧矢面光斑的尺寸大小基本相等, 这样双 Nd:YVO₄ 激光器易于获得高质量的基模光斑.

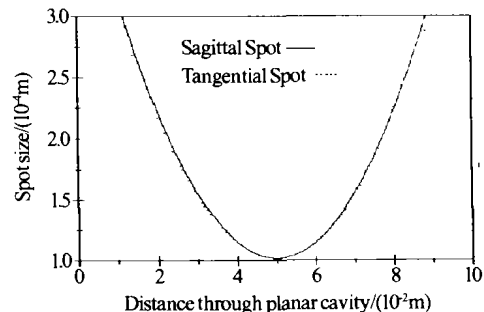


图 5 腔内不同距离处光斑的尺寸大小

Fig.5 Spot size change at different distance through cavity

2 实验装置及结果

图 1 所示的实验装置中, 泵浦源为武汉凌云的 LYF-1 半导体激光器, 二极管阵列发出的光经过单

光纤耦合输出, 光纤芯径为 $400\ \mu\text{m}$, 数值孔径为 0.22 , 最大输出功率为 $24\ \text{W}$. 准直聚焦系统为自行研制的两个凸透镜组构成, (为了尽可能减少球差, 凸透镜两端曲率不一样), 其物距为 $30\ \text{mm}$, 像距为 $32\ \text{mm}$, 将泵浦光束聚焦为直径约 $500\ \mu\text{m}$ 的光斑. 所用的 Nd:YVO_4 晶体 A、B、C 均为中科院福建物质结构所提供, 采用 a 轴向切割, 实现 $1064\ \text{nm}\pi$ 形偏振. 激光晶体 A 和 B 的 Nd 掺杂浓度为 0.3% , 尺寸为 $3\ \text{mm}\times 3\ \text{mm}\times 9\ \text{mm}$. 晶体 A 一端镀 $1064\ \text{nm}$ 高反(反射率大于 99.9%)和 $808\ \text{nm}$ 高透(透过率约为 95%), 作为输入腔镜使用, 另一端镀 $1064\ \text{nm}$ 增透(反射率约为 0.2%). 晶体 B 一端镀 $808\ \text{nm}$ 高透(透过率约为 95%)和 $1064\ \text{nm}$ 高反(反射率约为 85%), 作为输出腔镜, 另一端镀 $1064\ \text{nm}$ 增透(反射率约为 0.2%). 输出镜 M 为 $1064\ \text{nm}$ 激光的输出镜, 其一端镀 $808\ \text{nm}$ 高透, 另一端镀 $1064\ \text{nm}$ 全反. 采用循环水冷却激光晶体温度, 为了达到良好的热接触, 晶体侧面涂有银粉, 再使用钢紧裹, 分别被置入精心设计的四周通有冷却水的铜块中, 水循环制冷. 实验中晶体表面温度控制在 17.5°C . 冷却器为美国 NESLB 生产的 RTE 恒温冷却水循环器, 在 -25°C 到 150°C 温度区间内稳定度可以保持在 0.01°C , 可以严格的控制 Nd:YVO_4 晶体温度.

利用图 1 的实验装置, 基于腔型分析中所讨论的谐振腔稳定工作晶体间距的范围, 利用 A、B 两块晶体, 使晶体间距离为 $84\ \text{mm}$ 、 $118\ \text{mm}$ 、 $150\ \text{mm}$ 等, 分别进行了平面平行腔的建构实验. 其晶体间距为 $84\ \text{mm}$ 和 $118\ \text{mm}$ 的实验结果如图 6 所示.

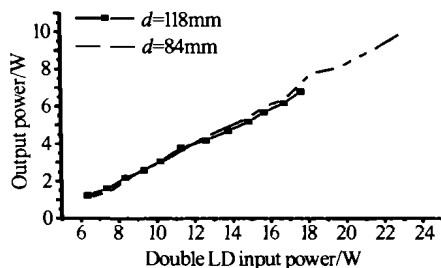


图 6 晶体间距离不同时双 Nd:YVO_4 激光器的输出功率实验结果

Fig. 6 Experiment results of double Nd:YVO_4 laser's output power with different space between two crystals

图 6 表明在高功率运转时, 两晶体块之间的间距改变, 对于输出功率并没有多大影响. 晶体间距在 $84\ \text{mm}$ 时, 我们分别使一个半导体激光器工作, 双 Nd:YVO_4 固体激光器均有稳定的 $1064\ \text{nm}$ 激光输出, 该实验与图 4 理论分析的热透镜焦距对腔的稳定建构相一致. 并在双端半导体激光器输出最大功率的范围内, 未出现输出功率降低的现象, 这表明了激光晶体的热透镜效应未对输出功率起制约作用.

在此基础之上, 固定激光晶体之间距离 $d = 84\ \text{mm}$ 不变, 更换晶体 C 与晶体 B 构成谐振腔, 晶体 C 的规格为 $3\ \text{mm}\times 3\ \text{mm}\times 6\ \text{mm}$, 掺杂浓度为 0.7% , a 切割, 两端镀膜情况与晶体 A 相同. 双 Nd:YVO_4 激光器的输出功率如图 7 所示.

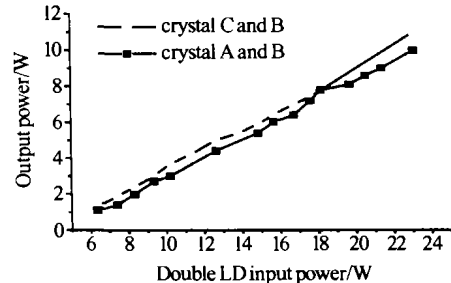


图 7 掺杂浓度不同时双 Nd:YVO_4 输出功率的实验结果

Fig. 7 Double Nd:YVO_4 laser's output power with two crystals have different consistency

在两个半导体激光器的抽运功率为 $23.05\ \text{W}$ 时, 考虑到准直聚焦系统只有 90% 的传输效率, 实际耦合进入双 Nd:YVO_4 激光器平面平行腔的功率为 $23.05 \times 90\% = 20.74\ \text{W}$, 获得了 $11\ \text{W}$ 的 $1064\ \text{nm}$ TEM_{00} 模激光输出, 其光-光转化效率约为 53% . 图 7 结果也表明, 提高单端激光晶体 Nd^{3+} 的掺杂浓度, 使得对于泵浦光的利用率得到了提高, 这不仅不会影响平面平行腔的稳定性, 并且可以明显地提高双 Nd:YVO_4 激光器的输出功率.

3 结论

通过实验分析, 泵浦光在激光晶体内的温度梯度场引起的热透镜效应可使得平行平面谐振腔处于稳定工作区, 对于腔的重新建构起到重要的作用.

参考文献

- 1 Kuwano Y, Saito S. Nd:YVO_4 single crystal for LD pumped solid state laser. *Laser Tes*, 1990, **16**(5): 616 ~ 621
- 2 吕百达编著. 固体激光器件. 北京: 北京邮电大学出版社, 2002. 123 ~ 132
- 3 Lü B Da. Solid-state-lasers. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunication Press, 2002. 123 ~ 132
- 3 Driedger K P, Ifflander R M, Weber H. Multi-rod, resonators for high-power solid-state lasers with improved beam quality. *IEEE J Quantum Electronics*, 1988, **24**(4): 665 ~ 674
- 4 杨盛宜, 王振家, 侯延冰, 等. 三棒 Nd:YAG 激光谐振腔的分析. *激光杂志*, 1999, **20**(4): 50 ~ 52
- 5 Yang S Y, Wang Z Ja, Hou Y B, et al. *Laser Journal*, 1999, **20**(4): 50 ~ 52
- 5 李正佳, 夏文建, 朱长虹, 等. 多棒高功率固体激光器动态模匹配研究. *激光技术*, 1998, **22**(5): 284 ~ 286
- 6 Li Z J, Xia W J, Zhu C H, et al. *Laser Technology*, 1998, **22**

- (5):284 ~ 286
- 6 Chen Y F, Lan Y P, Wang S C. Efficient high-power diode-end-pumped TEM₀₀ Nd:YVO₄ laser with a planar cavity. *Optics Letters*, 2000, **25**(14):1016 ~ 1018
- 7 邹英华, 孙陶亨编著. 激光物理学. 北京: 北京大学出版社, 1991. 57 ~ 76
Zou Y H, Sun T H. *Laser Physics*. Beijing: Beijing University Press, 1991. 57 ~ 76
- 8 Innocenzi M E, Yura H T, Fincher C L, *et al.* Thermal modeling of continuous-wave end-pumped solid-state lasers. *Appl Phys Lett*, 1990, **56**(19):1831 ~ 1933
- 9 侯学元, 李宇飞, 孙渝明, 等. 热焦距的动态测量, 光子·激光, 1999, **10**(3):276 ~ 277
Hou X Y, Li Y F, Sun Y M, *et al.* *Journal of Optics · Laser*, 1999, **10**(3):276 ~ 277

Influence Cavity Stability of Thermal Effect in End-pumped Double Nd:YVO₄ Laser

Li Long^{1,2}, Zhang Wei¹, Tian Laike¹, Bai Jintao¹, Hou Xun^{1,2,3}

¹ Institute of Photonics & Photo-Technology, and Provincial Key Laboratory of Photoelectronic Technology, Northwest University, Xi'an 710069

² School of Electronic & Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049

³ State Key Lab. of Transient Optical Technology, Xi'an Institute of Optics & Precision Mechanics, Xi'an 710068

Received date: 2003-02-15

Abstract Multi-rod laser crystals in series can improve solid state laser output power, so double Nd:YVO₄ crystals laser is introduced. Plane - plane cavity is formed by laser crystals' coating end - surfaces. Stability of double Nd:YVO₄ crystals laser's equivalent cavity is analyzed, theory result expresses that crystal's thermal lens generated by laser crystal absorbing pumped power will play important effects to cavity stability. So double Nd:YVO₄ laser is first invented, when pump power is 20.74 W, 11 W stable CW TEM₀₀ 1064 nm laser is obtained, optical-optical transform efficiency is 53%, and experimental result which double Nd:YVO₄ laser was operated with different Nd³⁺-doped concentration laser crystals is discussed.

Keywords Double Nd:YVO₄ laser; Thermal lensing effect; Equivalent cavity; Stability analyzes



Li Long was born in 1972. He received the B. S. degree in 1995 and the M. S. degree in 2001 from Shanxi Teacher University. He is an instructor at Xi'an University of Architecture & Technology. He now is studying for Ph. D. degree in Xi'an Jiaotong University. He works at Institute of Photonics & Photo-Technology, and Provincial Key Laboratory of Photoelectronic Technology, Northwest University. His major is LD pumped all-solid-state lasers.