

文章编号: 1001-3806(2006)06-0597-04

双端抽运双 Nd:YVO₄ 连续绿光激光器

解慧明^{1,2}, 陈浩伟², 贾森², 李莉莎¹, 李隆², 赵云青², 白晋涛^{2*}, 侯洵²

(1. 西北大学 物理学系, 西安 710069 2. 西北大学 光子学与光子技术研究所 陕西省光电子技术重点实验室, 西安 710069)

摘要: 为了提高半导体激光器抽运的全固态激光器的输出功率与光-光转换效率, 设计并使用了双端抽运双 Nd:YVO₄ 绿光激光器。通过激光晶体温度场特性的研究以及依据光束的传输矩阵, 分析了双激光晶体热透镜效应对谐振腔稳定性的影响, 设计了双端抽运双激光晶体折叠腔。在双端抽运双 Nd:YVO₄ 绿光激光器系统中, LBO 晶体采用了类非临界相位匹配腔内倍频方式, 当抽运光功率为 26.56W 时, 获得了 5.5W 的稳定连续绿光输出, 其光-光转换效率为 20.7%。结果同时表明, 在谐振腔内插入双激光增益介质, 不仅可以提高激光器的光-光转换效率, 而且两个激光晶体热透镜效应相互作用的结果可以增强谐振腔的稳定性。

关键词: 激光器; 双 Nd:YVO₄ 晶体; 折叠腔; 谐振腔稳定条件
中图分类号: TN248.1 **文献标识码:** A

Double-end-pumped double Nd:YVO₄ crystals continuous green laser

XIE Hui-ming^{1,2}, CHEN Hao-wei², JIA Sen², LI Li-sha¹, LI Long²,
ZHAO Yun-qing², BAI Jin-tao², HOU Xun²

(1. Department of Physics, Northwest University, Xi'an 710069, China 2. Provincial Key Laboratory of Photoelectronic Technology Institute of Photonics and Photo-technology Northwest University, Xi'an 710069, China)

Abstract In order to improve the output power and the optical-optical conversion efficiency of a laser diode pumped all-solid-state laser, a double Nd:YVO₄ crystals green laser was designed. Through investigation of temperature field distribution in laser crystal and based on the transmission matrices, the stable condition of cavity influenced by the thermal lens effects of double laser crystals was analyzed and a folded cavity of double-end-pumped double Nd:YVO₄ crystals was introduced. In double-end-pumped double Nd:YVO₄ crystals green laser system, θ -type noncritical phase matching LBO crystal was used as intracavity doubling frequency. When the pump power of two diode lasers was 26.56W, the 5.5W CW 532nm green laser was got and the optical-optical conversion efficiency reached up to 20.7%. The result shows that the double laser gain mediums inserted in cavity can not only improve the optical-optical conversion efficiency of laser, but also enhance the resonant stability through the interaction of two laser crystals' thermal lens effect.

Key words lasers; double Nd:YVO₄ crystals; folded cavity; the stable condition of cavity

引 言

激光二极管抽运的全固体激光器与传统的灯抽运激光器相比, 具有高效、长寿命、全固化、热效应和体积小等优点, 在工业加工、高密度光存储、生物医学诊断、信息通讯、光学测量和传感、彩色显示等许多领域有着广泛的应用^[1]。采用端面抽运方式不仅可获得较高激光功率, 而且易获得单模输出^[2]。

在同一谐振腔中置入两个 Nd:YVO₄ 晶体, 这种双端抽运双 Nd:YVO₄ 激光器不仅可以提高激光器的稳定性, 而且提高了激光器的光-光转化效率^[3-6]。作者通过端面抽运、激光晶体温度场的研究, 得出了不同抽运功率下的激光晶体热透镜焦距变化规律。并对双 Nd:YVO₄ 激光器 Z 型折叠腔的稳定性进行了研究。在抽运光功率为 26.56W 时, 获得了 5.5W 的稳定连续绿光输出, 其光-光转换效率为 20.7%。结果表明, 在同一谐振腔中两个激光晶体热焦距的相互作用结果可使激光谐振腔的稳定性得到明显的增强。

1 激光晶体温度场及热透镜焦距的研究

1.1 单端抽运、激光晶体内部温度场分布特点

激光晶体内产生的热量可通过热传导方式由冷却

基金项目: 陕西省教育厅重大产业化培育资助项目 (104JC30)

作者简介: 解慧明 (1966-), 女, 博士研究生, 从事激光技术与器件研究。

* 通讯联系人。E-mail: baij@nwu.edu.cn

收稿日期: 2005-10-27; 收到修改稿日期: 2005-12-12

铜块散失,图 1为循环水冷激光晶体热模型图,其中激光晶体通光面的尺寸为 $a \times b$,晶体外围为冷却铜块。抽运光斑处于晶体中心。

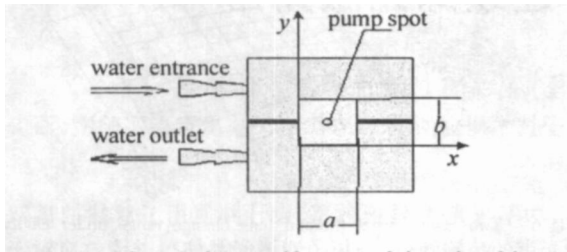


Fig 1 Schematic diagram of laser crystal thermal model

光纤耦合半导体激光器的抽运激光经过耦合后入射到激光晶体端面。抽运光传输光强的空间分布可以用高斯函数来近似^[7],设抽运光平行 z 轴入射到 $z = 0$ 面,并辐射在晶体中心时,在 $z = 0$ 面 ($x-y$ 面)上抽运光分布表达式为:

$$I(x, y, 0) = I_0 e^{-2\left(\frac{x-a/2}{w}\right)^2 - 2\left(\frac{y-b/2}{w}\right)^2} \quad (1)$$

式中, I_0 为抽运光中心在 $z = 0$ 面处的功率密度, w 为光束的高斯半径。

由于激光晶体荧光量子效应和内损耗吸收抽运光的能量远大于其它原因晶体吸收的能量,仅考虑晶体由于荧光量子效应和内损耗吸收抽运光能量发热^[8,9]。在 $z = z$ 面晶体吸收能量产生的热功率密度为:

$$q_v(x, y, z) = \beta \eta I(x, y, z) = I_0 \beta \eta e^{-2\left(\frac{x-a/2}{w}\right)^2 - 2\left(\frac{y-b/2}{w}\right)^2} \cdot e^{-\beta z} \quad (2)$$

式中, η 为由荧光量子效应和内损耗决定的热转换系数, $\eta = 1 - \lambda_p / \lambda_l$,其中 λ_p 为半导体激光器抽运光波长 808nm, λ_l 为谐振腔的振荡激光波长 1064nm。

由于晶体放置在冷却铜块内,其侧面温度保持相对恒定,设为 u_w 。作为热模型数学处理可设其为 0(相对),得出温度场后,再叠加冷却环境温度 u_w 。晶体的两个通光端面与空气相接触,从两端面和空气热交换流出的热量远远小于从晶体侧面通过传导流出的热量,因此可假设晶体的两端面绝热,热模型的边界条件为:

$$\begin{cases} u(0, y, z) = 0; u(a, y, z) = 0 \\ u(x, 0, z) = 0; u(x, b, z) = 0 \\ u_z(x, y, 0) = 0; u_z(x, y, c) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

由于激光晶体内部有热源,则晶体内部热传导遵守 Poisson 方程:

$$u_{xx} + u_{yy} + u_{zz} = -\frac{q_v}{\lambda} \quad (4)$$

式中, λ 为晶体导热系数或称为热导率。

由热传导方程(4)式以及晶体所满足的边界条件(3)式,可得激光晶体内部温场分布的一般解析表达

式:

$$u(x, y, z) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{l=0}^{\infty} A_{nml} \sin \frac{n\pi}{a} x \sin \frac{m\pi}{b} y \cos \frac{l\pi}{c} z \quad (5)$$

式中, A_{nml} 为待定系数:

$$A_{nml} = \frac{8I_0 \beta c \eta (1 - e^{-\beta c} \cos l\pi)}{\lambda ab \pi^2 (\beta^2 c^2 + l^2 \pi^2)} \left[\frac{n^2}{a^2} + \frac{m^2}{b^2} + \frac{l^2}{c^2} \right] \times \int_0^a \int_0^b e^{-2\left(\frac{x-a/2}{w}\right)^2 - 2\left(\frac{y-b/2}{w}\right)^2} \sin \frac{n\pi}{a} x \sin \frac{m\pi}{b} y dx dy \quad (6)$$

式中, n, m, l 为分立的正整数,由归一化的本征函数决定。可利用 MATHMATICA 计算软件根据(6)式得出端面抽运 Nd:YVO₄晶体内部温度场的分布特点,如图 2所示。

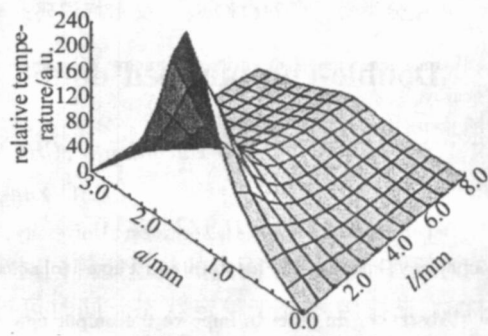


Fig 2 Three-dimensional temperature field distribution diagram of quadrate Nd:YVO₄ crystal ($x = a/2$) by a diode laser end-pumped

1.2 激光晶体热透镜焦距的变化规律

端面抽运固体激光器中,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^[7]:

$$f = \frac{\pi K_c w_p^2}{P_{ph} (dn/dT)} \left[\frac{1}{1 - \exp(-\beta l)} \right] \quad (7)$$

式中, K_c 为热传导系数; w_p 为抽运光光斑半径; P_{ph} 为引起热效应的抽运功率(约占总功率的 20%); dn/dT 为热光系数; β 为吸收系数; l 为激光晶体长度。对于掺杂质量分数为 0.5%的 Nd:YVO₄晶体, $K_c = 0.0523 \text{ W} \cdot (\text{K} \cdot \text{cm})^{-1}$, $\beta = 14.8 \text{ cm}^{-1}$ ^[10], $dn/dT = 3.0 \times 10^{-6} / \text{K}$, $w_p = 350 \mu\text{m}$, $l = 5 \text{ mm}$ 。在抽运功率为 20W,经过(7)式,可以得出激光晶体的热透镜焦距为 15cm。使用了 HOU 等人的热焦距的动态测量方法^[11],其实验结果与数值计算相吻合。

2 热等效谐振腔稳定分析

在双端抽运 Nd:YVO₄/LBO 连续绿光激光器^[12-14]的基础上,在激光谐振腔中再插入 1块 Nd:YVO₄晶体,实现了双 Nd:YVO₄绿光激光器。图 3为激光二极管双端抽运双 Nd:YVO₄/LBO 绿光激光器实验装置图。

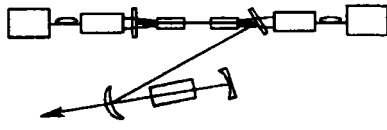


Fig 3 Schematic diagram of diode lasers double-ends pumped Nd:YVO₄/LBO green laser

Z型折叠腔的热透镜等效腔的结构如图 4 所示, l_n 为非线性晶体 LBO 的长度与折射率; θ φ 分别为镜 M₂, 镜 M₃ 处的折叠角, f_{t1}, f_{t2} 分别为两个激光晶体热焦距。

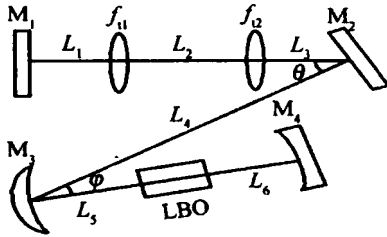


Fig 4 Thermal lens equivalent cavity constructive diagram of Z-type fold cavity

根据谐振腔的稳定性条件为:

$$\begin{cases} |(A_t + D_t)/2| \leq 1 \\ |(A_s + D_s)/2| \leq 1 \end{cases} \quad (10)$$

即只有在子午面和弧矢面内的往返矩阵同时满足稳定性条件时, 谐振腔才处于稳定状态。同时可计算出谐振腔内基模高斯光束 q 参数和往返矩阵各元素之间的关系为:

$$\frac{1}{q_{t(s)}} = \frac{D_{t(s)} - A_{t(s)}}{2B_{t(s)}} - i \sqrt{\frac{|A_{t(s)} + D_{t(s)}|}{2}} \frac{1}{R_{t(s)}} - i \frac{\lambda}{\pi w_{t(s)}^2} \quad (11)$$

式中, R 为谐振腔内高斯光束等相位曲率半径, w 为其等相位光斑半径。下标 t, s 分别表示谐振光束的子午面和弧矢面。根据上述条件, 用计算机处理有关的数据, 研究激光晶体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。

从图 5 图 6 可以得出两个晶体的热焦距各自在 10cm 到 25cm 变化时, 谐振腔振荡光束的子午面光斑、

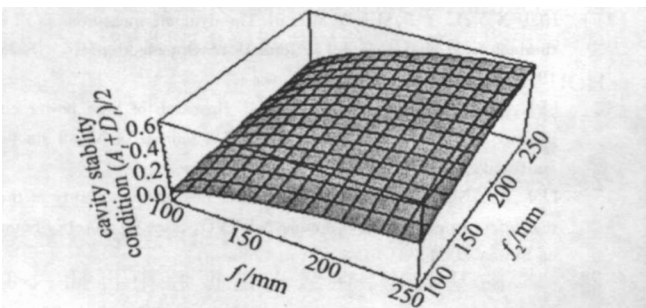


Fig 5 Two laser crystal thermal lens change range under cavity meridional plane stable condition

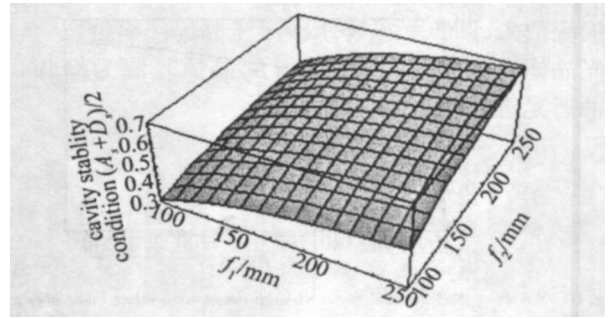


Fig 6 Two laser crystal thermal lens change range under cavity sagittal plane stable condition

弧矢面光斑均处于稳定条件, 并且两个面内的变化趋势也基本一致。这说明谐振腔内插入的两个激光晶体可以选取不同的掺杂浓度的晶体。双晶体激光器具有建构灵活等特点。

从图 7 图 8 可以得出一个激光晶体处于抽运状态, 另一个激光晶体热焦距有着较大的变化范围。

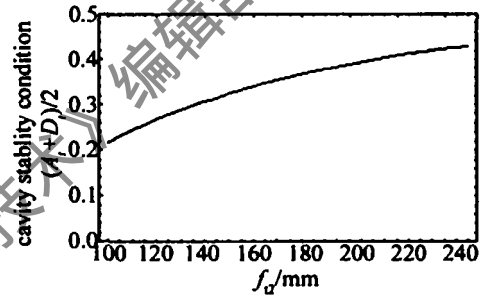


Fig. 7 Laser crystal 2 thermal lens f_2 change range under cavity meridional plane stable condition with $f_1 = 150\text{mm}$

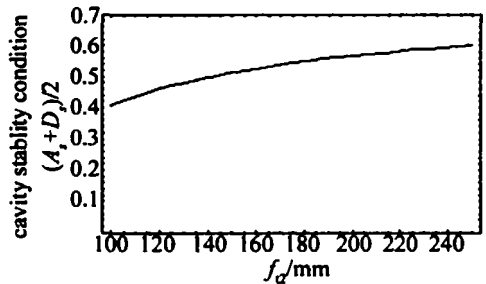


Fig. 8 Laser crystal 2 thermal lens f_2 change range under cavity sagittal plane stable condition with $f_1 = 150\text{mm}$

从图 9 图 10 可以得出在双晶体折叠腔中, 只要有一个晶体处于抽运状态, 产生的热焦距便可使激光器处于谐振状态。

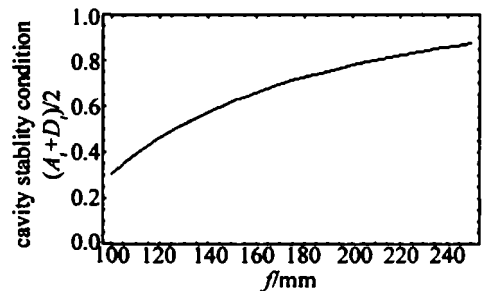


Fig 9 Laser crystal thermal focus change range with other laser crystal not working under cavity meridional plane stable condition

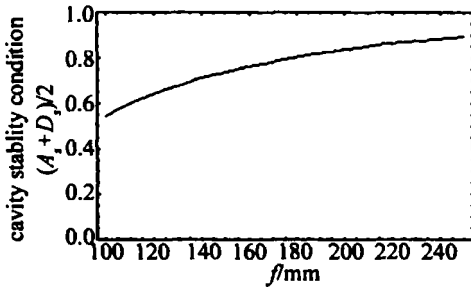


Fig. 10 Laser crystal thermal focus change range with other laser crystal not working under cavity sagittal plane stable condition

从图 11、图 12 可以得出, 两个激光晶体热焦距相同, 即两台半导体激光器的输出功率相同时, 两个激光晶体之间具有较大的调整空间。说明此谐振腔具有调整灵活的特点。

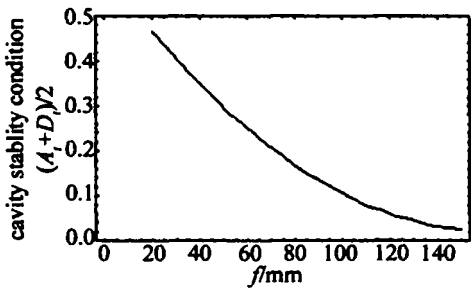


Fig. 11 Distance adjust range of two laser crystals with same thermal focus under cavity meridian plane stable condition

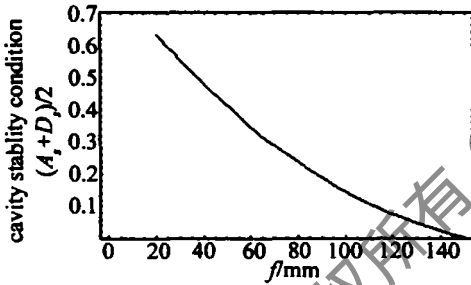


Fig. 12 Distance adjust range of two laser crystals with same thermal focus under cavity sagittal plane stable condition

3 实验结果

激光二极管双端抽运双 Nd:YVO₄/LBO 绿光激光器实验装置, 采用两台 LD 双端面抽运双通倍频方式。LD 耦合后可以将抽运光聚焦为 450μm 左右光斑, 耦合效率 83%。Nd:YVO₄ 晶体采用 a 轴向切割, 掺 Nd³⁺ 质量分数为 1%, 尺寸为 3mm × 3mm × 5mm。为了实现双端抽运, 两端均镀有对 810nm 和 1064nm 的双色增透膜。LBO 晶体尺寸为 3mm × 3mm × 10mm, 两通光面镀 1064nm 和 532nm 双色增透膜。

实验中 LBO 晶体采用 18℃ 恒温加角度调谐方式。对于 Nd:YVO₄ 晶体和 LBO 晶体同时进行冷却, 冷却

器为美国 NESLB 生产的 RTE 恒温冷却水浴循环器, 在 -25℃ 到 150℃ 温度区间内稳定度可以保持在 0.01℃。当抽运光功率为 26.56W 时, 获得了 5.5W 的基模绿光输出, 光-光转换效率为 20.7%, 激光系统运行 1h 输出绿光功率波动小于 2%。

4 结论

通过理论分析, 可以得出激光晶体的热透镜效应对于腔的稳定性起到了至关重要的作用。双激光晶体激光器中两个激光晶体热焦距的相互作用结果可使激光谐振腔的稳定性得到增强。研究对于优化双端抽运激光器的特性以及提高输出功率具有一定的指导意义。

参考文献

- [1] FAN T Y, BYER R L. Diode laser pumped solid-state lasers [J]. IEEE J Q E, 1988, 24(6): 895~912.
- [2] FIELD R A, BRNBAUM M, FINCHER C L. Highly efficient Nd:YVO₄ diode-laser end-pumped laser [J]. Appl Opt Lett, 1987, 51(23): 1885~1886.
- [3] CHEN Y F, LAN Y P, WANG S C. Efficient high-power diode-end-pumped TEM₀₀ Nd:YVO₄ laser with a planar cavity [J]. Opt Lett, 2000, 25(14): 1016~1018.
- [4] DRIEDGER K P, IFFLANDER R M, WEBER H. Multirod Resonators for high-power solid-state lasers with improved beam quality [J]. IEEE J Q E, 1988, 24(4): 665~6742.
- [5] YANG Sh Y, WANG Zh J, HOU Y B *et al*. Analyses of three-rod resonator for Nd:YAG laser [J]. Laser Journal, 1999, 20(4): 50~52 (in Chinese).
- [6] LI Zh J, XIA W J, ZHU Ch H *et al*. Study on the dynamic mode matching of multirod solid state lasers [J]. Laser Technology, 1998, 22(5): 284~286 (in Chinese).
- [7] INNOCENZIM E, YURA H T, FRUGHER C L *et al*. Thermal modeling of continuous-wave end-pumped solid state lasers [J]. A P L, 1990, 56(19): 1831~1833.
- [8] YU J. Theoretical study on thermal beam focusing in longitudinally-pumped solid-state laser rods [J]. High Power Laser And Particle Beams, 2000, 12(1): 27~31 (in Chinese).
- [9] SHI P, LIL GANG A Sh *et al*. Thermal effect research of Nd³⁺ doped laser crystals in end-pumped all-solid-state lasers [J]. Laser Technology, 2004, 28(2): 177~180 (in Chinese).
- [10] HE J L, HOU W, ZHANG H L *et al*. Continuous-wave output of 5.5W 532nm by intracavity frequency doubling of an Nd:YVO₄ laser [J]. Chinese Physics Letters, 1998, 15(6): 418~419.
- [11] HOU X Y, LIY F, SUN Y M *et al*. The dynamic measurement of the thermal focal distances [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 1999, 10(3): 276~277 (in Chinese).
- [12] LIL, ZHAO Zh M, ZHANG W *et al*. Research of high power end-pumped Nd:YVO₄/LBO green laser [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2003, 37(6): 642~645 (in Chinese).
- [13] LIL, ZHANG W, TIAN L K *et al*. Influence cavity stability of thermal effect in end-pumped double Nd:YVO₄ laser [J]. Acta Photonica Sinica, 2004, 33(1): 4~7 (in Chinese).