

文章编号: 0258-7025(2007)03-0359-05

激光二极管端面抽运 Nd:GdYVO₄ 晶体 热效应分析及倍频研究

孙尧, 李涛, 于果蕾, 张帅一, 李健

(山东师范大学物理与电子科学学院, 山东 济南 250014)

摘要 通过求解泊松热传导方程, 得出了端面抽运下矩形截面 Nd:GdYVO₄ 激光晶体内部温度场分布以及 Nd:GdYVO₄ 激光晶体抽运端面达到热平衡后的热形变量。当抽运功率为 12 W, 抽运光斑半径 $w_p = 320 \mu\text{m}$ 时, Nd:GdYVO₄ 激光晶体的热形变量为 $0.855 \mu\text{m}$ 。根据 Nd:GdYVO₄ 晶体内部温度场分布和晶体抽运端面达到热平衡后的热形变量, 进而计算出晶体热焦距随抽运功率的变化。通过 ABCD 矩阵进行了腔参数优化, 选取了更有效压缩 KTP 上基模光斑半径的 V 腔进行腔内倍频实验。在抽运功率为 6.71 W 时 Nd:GdYVO₄ 获得了 1.73 W 稳定倍频绿光输出, 光-光转换效率达到 25.8%, 绿光非稳度为 1.13%。

关键词 激光技术; 固体激光器; 热效应; 泊松方程; Nd:GdYVO₄ 晶体; 倍频

中图分类号 TN 248.1 文献标识码 A

Characteristics of Laser Diode End-Pumped Laser Crystal on Thermal Effect and Second Harmonic Generation

SUN Yao, LI Tao, YU Guo-lei, ZHANG Shuai-yi, LI Jian

(College of Physics and Electronics, Shandong Normal University, Jinan, Shandong 250014, China)

Abstract Based on Poisson equation, a thermal model of rectangle end-pumped Nd:GdYVO₄ was built. The crystal temperature fields of Nd:GdYVO₄ were distributed. Then the distortion on pump face was calculated. When the pumping power is 12 W, the radii of pump beam is $w_p = 320 \mu\text{m}$, the distortion of Nd:GdYVO₄ is $0.855 \mu\text{m}$. Based on the previous calculation, the focus of thermal lens changing with input power was calculated. Using ABCD matrix to optimize cavity parameters, V-shaped folded cavity which could compress the laser mode radii on KTP effectively was selected. With the pumped power of 6.71 W, an 1.73 W output power of stable frequency-doubled green light was achieved by V-shaped folded cavity, giving an optical-optical conversion efficiency of 25.8%, and green light non-stability $\Delta\bar{P}/\bar{P} = 1.13\%$.

Key words laser technique; solid-state laser; thermal effect; Poisson equation; Nd:GdYVO₄ crystal; second harmonic generation

1 引言

大功率激光二极管(LD)端面抽运固体激光器(DPSL)具有体积小、稳定性好、寿命长等优点,近年来成为人们研究的热点^[1,2]。在大功率抽运过程中,非辐射跃迁产生的热加上固体激光介质在光抽运的

过程中吸收的部分热量,导致激光晶体温度升高,与冷却系统的共同作用,在晶体中形成温度梯度,引起晶体的折射率以及热应力的变化,对腔内激光模式产生影响,即热透镜效应^[3]。分析、解决热透镜效应问题的关键是激光晶体内部温度场的准确计算。

目前有很多关于矩形截面激光晶体的内部温度

收稿日期:2006-10-13; 收到修改稿日期:2006-11-16

基金项目:山东省科技厅科技攻关计划(031080125)资助项目。

作者简介:孙尧(1981—),女,山东省青岛市人,硕士研究生,主要从事全固态激光器件和非线性光学等方面的研究。

E-mail:sunyaoyao810122@gmail.cn

导师简介:李健(1963—),男,山东省滕州市人,教授,主要从事固体激光器件和非线性光学的研究。

E-mail:lijian@sdu.edu.cn (通信作者)

场和热形变量的报道^[4],但罕见对于矩形截面 Nd:GdYVO₄激光晶体的热效应分析。本文通过对激光二极管端面抽运、周边恒温冷却的矩形截面 Nd:GdYVO₄晶体的分析,求解泊松热传导方程,得出了 Nd:GdYVO₄激光晶体内部温度场分布,计算了 Nd:GdYVO₄激光晶体抽运端面达到热平衡后的热形变量,进而优化谐振腔参数。在此基础上采用 V 型折叠腔 KTP 腔内倍频^[5,6],在抽运功率为 6.71 W 时 Nd:GdYVO₄获得了 1.73 W 的稳定倍频绿光输出,光-光转换效率达到 25.8%,较以往的 Nd:GdYVO₄-KTP 绿光激光器^[1],输出功率和光-光转换效率都有了大幅的提高。

表 1 Nd:YVO₄, Nd:GdVO₄ 和 Nd:GdYVO₄ 激光特性参数比较

Table 1 Laser parameters of Nd:YVO₄, Nd:GdVO₄ and Nd:GdYVO₄

	Nd:YVO ₄	Nd:GdVO ₄	Nd:GdYVO ₄
Nd-iondoping concentration / %	0.5	0.5	0.5
Absorption coefficient (π) / cm ⁻¹	14.8	32.7	19.94
Absorption cross section / ($\times 10^{-20}$ cm ²)	24.54 (π), 9.14 (σ)	17.29 (π), 7.14 (σ)	19.69 (π), 6.41 (σ)
Absorption FWHM / nm	8 (π), 15 (σ)	4 (π), 5.8 (σ)	4.5 (π), 8.5 (σ)
Emission full-width half maximum (FWHM) / nm	0.96	1.8	3.7
Fluorescence lifetime / μ s	105	100	110
Thermal conductivity / (W/(cm · K))	0.05	0.117	0.125
Thermal expansion coefficient (10^{-6} K ⁻¹)	11.37	7.3	9.33

3 温度分布以及热形变量的计算

3.1 激光晶体热模型

Nd:GdYVO₄晶体吸收部分抽运光能量产生热量,通过紫铜块中循环水向周围散失。当抽运光通过激光晶体中心时,热模型如图 1 所示^[8]。

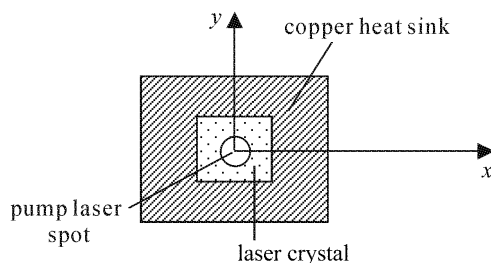


图 1 激光晶体热模型简图

Fig. 1 Schematic diagram of laser crystal thermal model

由于把晶体放置在紫铜块中用循环水进行冷却,所以假定晶体侧面温度保持相对稳定,设为 $u_w \approx 16$ °C。为了数学处理上方便,可以先预设为 0,最后再叠加上冷却水的温度。晶体两个通光端面与空气接触,热交换的热量远远小于通过晶体侧面热交

2 Nd:GdYVO₄ 和 Nd:YVO₄, Nd:GdVO₄ 的激光特性参数比较

Nd:YVO₄晶体具有较高的吸收系数和受激发射截面,Nd:GdVO₄晶体则具有较高的热传导率。在 Nd:YVO₄,Nd:GdVO₄的基础上,由 Y(Gd)部分地代替 Nd:GdVO₄(Nd:YVO₄)中的 Gd(Y)形成新的钒酸盐晶体 Nd:GdYVO₄。Nd:GdYVO₄具有和 Nd:YVO₄,Nd:GdVO₄相同的晶体结构,但由于融合了两种晶体的特点,具有自身的优势,如表 1 所示^[7]。

换流出的热量,因此可以假设晶体两个端面绝热,边界条件为

$$u(-\frac{a}{2}, y, z) = 0; \quad u(\frac{a}{2}, y, z) = 0, \quad (1)$$

$$u(x, -\frac{b}{2}, z) = 0; \quad u(x, \frac{b}{2}, z) = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial u(x, y, z)}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0; \quad \frac{\partial u(x, y, z)}{\partial z} \Big|_{z=l} = 0, \quad (3)$$

式中 a, b 为晶体矩形截面的长和宽, l 为晶体长度。

由于激光晶体内部有热源,遵循热传导泊松(Poisson)方程^[9~11]

$$K_x \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + q_v(x, y, z) = 0, \quad (4)$$

$$q_v = \frac{2\alpha P_{in}\eta}{\pi\omega_p^2}(1 - e^{-\alpha l})^{-1} e^{-\frac{2[(x-\frac{a}{2})^2 + (y-\frac{b}{2})^2]}{\omega_p^2}} e^{-\alpha z}, \quad (5)$$

式中 α 为晶体吸收系数; η 为由荧光量子效应和内损耗决定的热转换系数, $\eta = 1 - \frac{\lambda_p}{\lambda_1}$, $\lambda_p = 808$ nm, $\lambda_1 = 1064$ nm; P_{in} 为输入功率, ω_p 为光斑半径; K_x, K_y, K_z 为晶体各个方向上的热传导系数。

3.2 Nd:GdYVO₄ 晶体内部温度场分布以及热形变量

通过求解泊松方程,选择半导体激光器的抽运功率 $P_{in} = 12\text{ W}$, $\omega_p = 320\ \mu\text{m}$ 。得出 Nd:GdYVO₄ 晶体抽运端面温度场的分布如图 2(a)所示,图中圆环为等温线。图 2(b)则为晶体内部中心轴线上的温度分布情况。

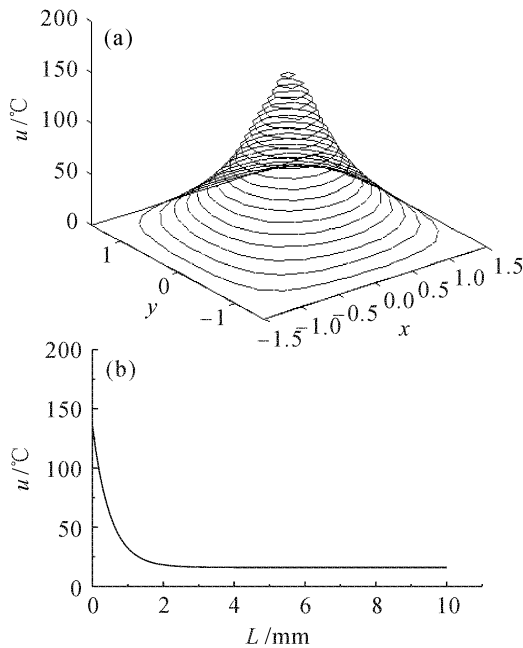


图 2 Nd:GdYVO₄ 晶体抽运端面(a)和抽运光中线 ($x = 0, y = 0$) 上(b)的温度分布

Fig.2 Temperature field distribution diagram (a) and centre temperature distribution diagram (b) of Nd:GdYVO₄

从图 2(a)可以看出,Nd:GdYVO₄ 中心最高温升分别约为 150 °C。而且从图 2(b)可以看出,Nd:GdYVO₄ 晶体前部中心温升比后部高很多。

设激光晶体内部一点温度为 0,当达到热平衡之后,温度变为 $u(x, y, z)$

$$\Delta T = u(x, y, z), \quad (6)$$

$$dl = \sigma u(x, y, z) dz, \quad (7)$$

$$\Delta l = \int_0^l dl = \int_0^l \sigma u(x, y, z) dz, \quad (8)$$

其中 σ 为激光晶体热膨胀系数。

激光晶体抽运端面的相对温升必然引起热形变。图 3 给出了当在抽运功率为 12 W,光斑半径 $\omega_p = 320\ \mu\text{m}$ 时,激光晶体沿抽运光中心方向 ($x = a/2; y = b/2$) 上抽运端面具有的热形变分布对比图。Nd:GdYVO₄ 热形变量为 $0.855\ \mu\text{m}$ 。热形变改变了晶体通过方向上的有效长度,并使晶体产生伴随热效应的高阶球差。

根据晶体内部温度场分布以及晶体表面热形

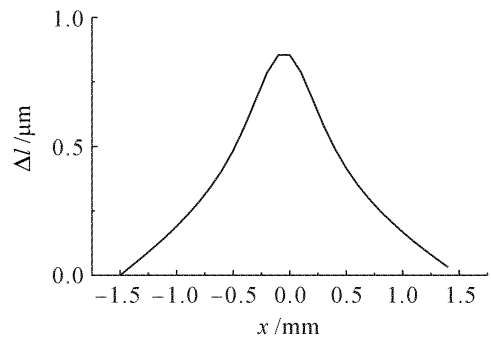


图 3 晶体抽运端面热形变图

Fig.3 Thermal distortion of the pumped faces

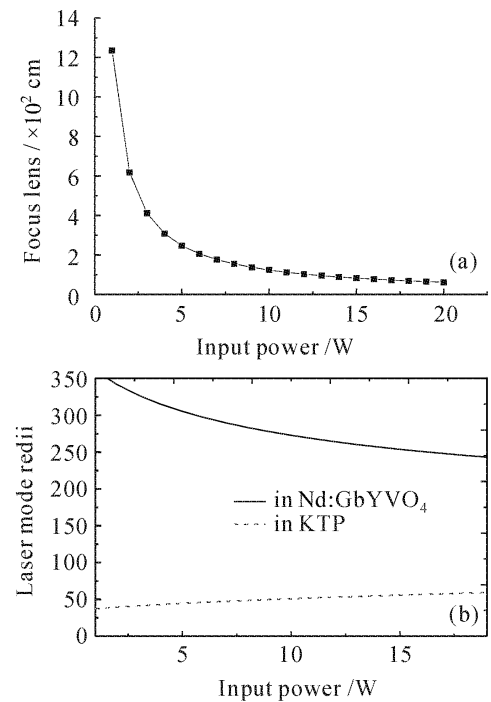


图 4 晶体热焦距(a)和光斑大小(b)随抽运功率的变化

Fig.4 Focus of thermal lens (a) and laser mode radii in crystal (b) versus input power

变,可计算出晶体的热焦距随抽运功率的变化^[10,11],如图 4(a)所示。由 ABCD 矩阵选取了更有效压缩 KTP 上光斑半径的 V 腔进行腔内倍频实验。激光晶体与倍频晶体上的光斑半径如图 4(b)所示。

4 Nd:GdYVO₄ 晶体腔内倍频特性

根据以上理论计算,采用 V 腔精确设定各个腔参数,实现了 Nd:GdYVO₄-KTP 腔内倍频连续绿光输出,实验装置如图 5 所示。

其中,LD 为美国相干公司生产的 FAP-System TM 型光纤耦合输出激光二极管,发射中心波长为 808 nm,最大输出功率为 30 W,光纤输出孔径 $D = 0.8\text{ mm}$,数值孔径为 0.22;光纤输出的激光经聚焦

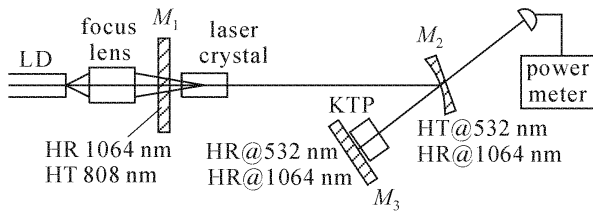


图 5 倍频特性实验装置示意图

Fig. 5 Schematic diagram of diode laser end-pumped second harmonic generation laser

耦合系统(focus lens)进行聚焦耦合,聚焦比例为1:0.8,聚焦后的光斑半径为 $320\ \mu\text{m}$;Nd:GdYVO₄(Nd:YVO₄)为a切割,尺寸均为 $3\ \text{mm}\times 3\ \text{mm}\times 10\ \text{mm}$,Nd³⁺原子数分数均为0.5%。晶体两面镀808 nm和1064 nm双色增透膜,晶体放入紫铜块内采用循环水冷却。M₁为平面输入镜,表面镀在808 nm高透和在1064 nm高反的介质膜,M₂为凹面折返镜兼绿光输出镜,曲率半径为80 mm,表面镀在532 nm高透和在1064 nm高反的双介质膜;M₃为平面谐振腔端镜,表面镀有在532 nm和1064 nm高反的双高反介质膜;KTP晶体的通光长度为10 mm,考虑到激光的偏振特性,晶体采用45°放置。为了比较两种晶体的倍频特性,选择相同的谐振腔参数,考虑到谐振腔的稳定性以及晶体的热透镜效应,通过计算,V型腔的两个臂长分别设计为100 mm和45 mm。实验结果如图6所示。

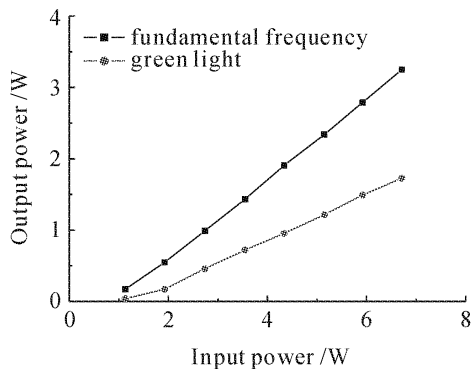


图 6 腔内基频以及倍频绿光输出特性

Fig. 6 Output of fundamental frequency and green light

采用V型折叠腔,将图5中M₃换成表面镀有对1064 nm的透射率 $T=10\%$ 的介质膜输出平面镜,测量了激光器基频输出特性,在抽运功率为6.71 W时获得了3.25 W的1064 nm基频光,光-光转换效率达到50.3%。放入KTP晶体,腔内倍频,在抽运功率为6.71 W时得到1.73 W的稳定倍频绿光输出,光-光转换效率达到25.8%。

为了测量绿光输出的稳定性,在抽运功率为6 W时,每隔3 min记录一个绿光输出功率,图7所示为1 h内所记录的绿光输出。输出功率平均值为 $\bar{P}=1.4939$,求均方根误差 $\Delta\bar{P}=[\sum_{i=1}^n(P_i-\bar{P})^2/n]^{1/2}=0.01687$,由此可求出1 h内功率非稳度为 $\Delta\bar{P}/\bar{P}=1.13\%$ 。

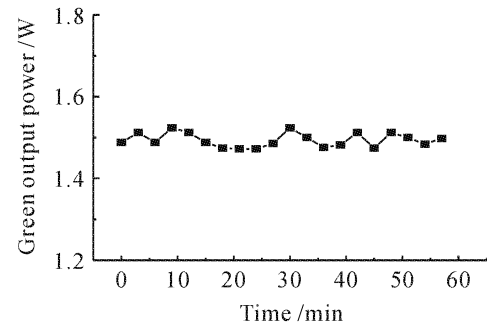


图 7 连续绿光输出随时间的变化关系

Fig. 7 CW green light output power with time

5 结 论

通过对激光二极管端面抽运激光晶体工作特点的研究,设计了Nd:GdYVO₄矩形截面激光晶体热模型,利用激光晶体周边恒温两端绝热的边界条件求解泊松热传导方程,得出了Nd:GdYVO₄激光晶体内部温度场分布,计算了Nd:GdYVO₄激光晶体抽运端面达到热平衡后的热形变量,进而推算出热透镜焦距随抽运功率的变化,以优化谐振腔参数。用V型折叠腔压缩KTP晶体上的光束尺寸,提高腔内倍频效率。在抽运功率为6.71 W时Nd:GdYVO₄获得了1.73 W的稳定倍频绿光输出,光-光转换效率达到25.8%。发现虽然Nd:GdYVO₄有较好的热性能,但Nd:GdYVO₄-KTP绿光激光器的平均输出功率以及稳定性都低于Nd:YVO₄-KTP绿光激光器,Nd:GdYVO₄作为一种新型晶体还不成熟,有待于进一步提高其激光特性指标,才有可能成为更加优良的激光晶体。

参 考 文 献

- Jie Liu, Qianqian Peng, Jimin Yang *et al.*. Diode-pumped Nd:Y_xGd_{1-x}VO₄ crystal continuous-wave laser [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(1):29~30
- Zheng Yi, Gao Mingyi, Yao Jianquan *et al.*. Study on thermal effect of anisotropic laser medium by LD end-pumped [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2003, **14**(10):1094~1098
郑 义,高明义,姚建铨等. LD端面泵浦各向异性激光介质的热效应研究[J]. *光电子·激光*, 2003, **14**(10):1094~1098
- Zhao Hongming, Zhao Shengzhi, Yang Kejian *et al.*. Q-switched intracavity doubling Nd:YVO₄/KTP laser with

- acoustic-optic [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(11):1294~1297
- 赵宏明, 赵圣之, 杨克建等. LD 泵浦 Nd:YVO₄/KTP 内腔倍频声光调 Q 理论和实验研究[J]. *光子学报*, 2004, **33**(11):1294~1297
- 4 Li Long, Shi Peng, Tian Laike *et al.*. Thermal deformation of a rectangle Nd-ion doped laser crystal by high power diode laser end-pumped [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(4):499~503
- 5 Zhao Zhiming, Li Long, Tian Feng *et al.*. High power end-pumped intracavity frequency doubling watt-level green laser [J]. *Laser Technology*, 2003, **27**(4):331~333
- 赵致民, 李 隆, 田 丰等. 高功率端面泵浦腔内倍频瓦级绿光激光器[J]. *激光技术*, 2003, **27**(4):331~333
- 6 Zhuo Zhuang, Jiang Qichang, Su Yanli *et al.*. Study for Cr⁴⁺:YAG passively Q-switched mode-locking properties of a new mixed vanadate crystal Nd:Gd_{0.42}Y_{0.58}VO₄ [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(10):1429~1432
- 卓 壮, 姜其畅, 苏艳丽等. 新型钒酸盐混晶 Nd:Gd_{0.42}Y_{0.58}VO₄/Cr⁴⁺:YAG 被动调 Q 锁模特性研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(10):1429~1432
- 7 Zhu Li, Zhang Huaijin, Meng Xianlin *et al.*. Grown and laser properties of Nd:GdVO₄ crystal at 1064 nm [J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 1999, **28**(3):229~232
- 祝 俐, 张怀金, 孟宪林等. Nd:GdVO₄ 晶体生长及其 1064 nm 的激光特性[J]. *人工晶体学报*, 1999, **28**(3):229~232
- 8 Li Long, Shi Peng, Liu Xiaofang *et al.*. Thermal effect of quadrate laser crystal with diode laser end-pumped [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, **32**(4):35~38
- 李 隆, 史 彭, 刘小芳等. LD 端面抽运长方形激光晶体的热效应[J]. *光电工程*, 2005, **32**(4):35~38
- 9 Shi Peng, Li Long, Liu Xiaofang *et al.*. Influence of eccentricity on thermal effect of Nd:GdVO₄ crystal with rectangle-section [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2005, **16**(10):1187~1192
- 史 彭, 李 隆, 刘小芳等. 偏心度对矩形截面 Nd:GdVO₄ 晶体热效应的影响[J]. *光电子·激光*, 2005, **16**(10):1187~1192
- 10 M. E. Innocenzi, H. T. Yura, C. L. Fincher *et al.*. Thermal modeling of continuous-wave end-pumped solid-state lasers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **56**(19):1831~1833
- 11 Ananada K. Cousins. Temperature and thermal stress scaling in finite-length end-pumped laser rods [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1992, **28**(4):1057~1069