

808 nm 与 888 nm 抽运 Nd:YVO₄ 热效应分析

艾庆康¹ 常亮¹ 陈檬^{1*} 李港¹ 麻云凤³ 樊仲维^{2,3}
牛岗² 余锦³ 康文运⁴ 贺凯⁴

¹ 北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124
² 北京国科世纪激光技术有限公司, 北京 100085
³ 中国科学院光电研究院, 北京 100080
⁴ 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094

摘要 根据 Nd:YVO₄ 晶体对 808 nm 和 888 nm 波长抽运光吸收特性的差异, 模拟了两种波长抽运下晶体的温度分布、应力分布以及当抽运光在 *a* 轴和 *c* 轴上的偏振分量变化时, 晶体在两种波长抽运下温度分布以及热焦距的变化。模拟结果表明, 888 nm 抽运下, Nd:YVO₄ 晶体在径向温度梯度大幅度减小, 晶体温度应力值远小于 808 nm 抽运; 并且 Nd:YVO₄ 的 *a* 轴与 *c* 轴对 888 nm 光吸收系数相同, 使得晶体的吸收不受抽运光偏振变化的影响, 从而使得谐振腔和输出的激光功率更加稳定。采用 888 nm 抽运, 是降低 Nd:YVO₄ 晶体热效应和提高 Nd:YVO₄ 激光器输出功率的有效途径之一。

关键词 激光器; 热效应; 888 nm; Nd:YVO₄ 晶体

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201138.0402001

Thermal Analysis of Nd:YVO₄ Pumped by 808 nm and 888 nm

Ai Qingkang¹ Chang Liang¹ Chen Meng¹ Li Gang¹ Ma Yunfeng³
Fan Zhongwei^{2,3} Niu Gang² Yu Jin³ Kang Wenyun⁴ He Kai⁴

¹ Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China
² Beijing GK Laser Technology Co., Ltd, Beijing 100085, China
³ Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China
⁴ Beijing Institute of Tracking and Communication Technology, Beijing 100094, China

Abstract Temperature and stress distribution of Nd:YVO₄ crystal are simulated according to the difference of optical absorption properties of Nd:YVO₄ crystals pumped by 808 nm and 888 nm, respectively. The changes of crystal temperature distribution and thermal focal length are also simulated when the pumping beam polarization components in *a*-axis and *c*-axis are changed. From simulation results, the crystal temperature gradient with 888 nm pump-wavelength is one sixth than that of 808 nm and the crystal temperature stress value is much less than that of 808 nm pump-wavelength. The resonator and output power are not affected by the change of pumping beam's polarization because the light absorption coefficients on *a*-axis and *c*-axis of Nd:YVO₄ are the same when pump wavelength is 888 nm. This is one of the effective ways to reduce Nd:YVO₄ crystals thermal effect and increase Nd:YVO₄ laser power with 888 nm pump-wavelength.

Key words lasers; thermal effect; 888 nm; Nd:YVO₄ crystal

OCIS codes 140.3580; 160.3380; 140.3410

收稿日期: 2010-09-21; 收到修改稿日期: 2010-12-06

基金项目: 国家 863 计划(2008AA031901)和北京市教委科研计划(KM201010005033)资助课题。

作者简介: 艾庆康(1982—), 男, 博士研究生, 主要从事全固态激光技术方面的研究。E-mail: ai.qingkang@gmail.com

导师简介: 李港(1950—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事超短脉冲及非线性光学方面的研究。

E-mail: lig@bjut.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: chenmeng@bjut.edu.cn

1 引 言

作为一种优良的激光晶体, Nd:YVO₄ 具有较高的增益, 大的受激发射截面, 其自然双折射特性可以产生线偏振光。采用端面抽运 Nd:YVO₄ 结构, 可以使得抽运光和激光光斑模式匹配良好, 因此可以提高抽运光转换效率, 并有较好的光束质量。然而在高功率抽运下, Nd:YVO₄ 较差的热特性和机械特性会使晶体产生很大的温度梯度, 过高的局部应力甚至会使晶体产生应力破碎, 因而限制了抽运功率的提高^[1~3]。此外, Nd:YVO₄ 对目前常用的 808 nm 抽运光呈线偏振吸收, 即对于 *a*-切割的 Nd:YVO₄ 晶体, 相互正交的两轴对 808 nm 光吸收系数有较大差别, 当抽运光的偏振方向在 Nd:YVO₄ 晶体两个轴向分布改变时, 会造成晶体温度分布的变化, 热透镜焦距也会有明显改变^[4], 从而影响激光输出的稳定性与光束质量。国外文献报道了采用 888 nm 波长光对 Nd:YVO₄ 进行抽运, 对于 *a*-切割晶体, 由于沿平行于 *c* 轴与沿垂直于 *c* 轴方向晶体对 888 nm 抽运光吸收系数相差很小, 因此吸收与抽运光偏振方向无关或受影响很小, 从而保证激光输出的稳定性^[5]。

为了详细了解 Nd:YVO₄ 晶体在 808 nm 和 888 nm 抽运下热效应的特性, 本文采用 Lascad 软件中的有限元分析模块 (FEA), 对 Nd:YVO₄ 晶体在两种不同波长抽运情况下的温度和热应力分布, 以及抽运光偏振性对热焦距影响的程度进行了模拟, 通过分析比较, 得出 888 nm 抽运 Nd:YVO₄ 晶体相对于传统 808 nm 抽运的优势, 为端面抽运 Nd:YVO₄ 向高功率方向发展提供一种新的思路。

2 Nd:YVO₄ 吸收谱

Nd:YVO₄ 晶体 3 个主吸收峰分别在 750, 810

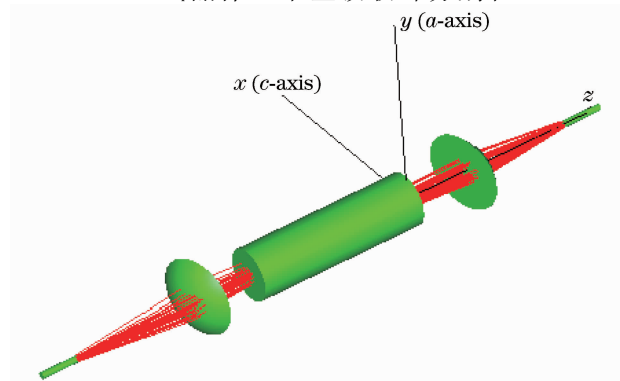


图 1 双端抽运 Nd:YVO₄ 结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of double-end pumping Nd:YVO₄

和 880 nm 附近, 其中在 810 nm 附近吸收最强, 吸收带宽大约为 20 nm。目前基本是采用 808 nm 波长抽运源。Nd:YVO₄ 是一种单轴晶体, 一般采用 *a* 轴切割 (如图 1), 晶体对偏振方向平行于 *c* 轴的抽运光的吸收大于垂直于 *c* 轴的抽运光, 大的吸收系数导致抽运光在很短距离内就被晶体吸收, 造成晶体热效应严重。如果要使抽运光在晶体内均匀吸收, 一般采用降低晶体掺杂浓度的方法, 但太低的掺杂浓度 (原子数分数小于 0.1%) 的精确度不易控制^[6,7]。从 Nd:YVO₄ 吸收谱上 (图 2) 可以看出, 当把吸收波长向右增长时, 在 875~895 nm 之间又出现了较强的吸收带, 而在 888 nm 附近 (图 2 中曲线相交点对应波长为 888.4 nm), 虽然与 808 nm 相比吸收系数小很多, 但晶体对 π 偏振光吸收与对 σ 偏振光吸收系数很接近, 因此受抽运光偏振态变化影响可以忽略, 晶体温度分布可以近似保持稳定分布。而且, 可以通过增加晶体在抽运光方向长度来提高对抽运光的吸收, 使抽运光分布比较均匀, 端面处温升较小^[8]。

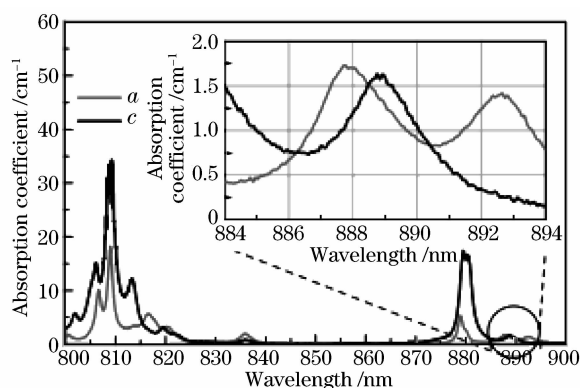


图 2 掺杂原子数分数为 1% 的 Nd:YVO₄ 的吸收谱

Fig. 2 Absorber spectra of Nd:YVO₄ with atom fraction of 1%

3 Nd:YVO₄ 在两种抽运波长下的热分布模拟

模拟所采用的模型结构如图 3 所示, 其中 Nd:YVO₄ 晶体为圆柱状, 长 10 mm, 直径 3 mm, *a* 轴切割, Nd 原子数分数为 1%。增益介质侧面水冷却。采用双端抽运, 抽运源为光纤耦合输出, 光纤输出孔径 400 μ m, 数值孔径 (NA) 为 0.22。图 3(a) 所示的谐振腔, 晶体内基模激光光斑直径假设为 800 μ m, 为取得较好模式匹配、提高抽运效率、获得好的光束质量, 抽运光斑应略大于腔内振荡的激光光斑尺寸^[9, 10], 因此选择曲率半径合适的准直透镜对光纤输出的抽运光会聚, 使之在晶体中心的焦斑直径为

1 mm。模拟时采用的晶体参数^[4,6,11]为：热膨胀系数： $4.43 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ （平行于 a 轴）， $11.37 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ （平行于 c 轴）；热导率： $5.10 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ （平行于 a 轴）， $5.23 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ （平行于 c 轴）；热光系数：

$dn/dT = 3.0 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ；杨氏模量： $86000 \text{ N}/\text{mm}^2$ ；泊松比：0.3；冷却温度：298 K；吸收系数： $\alpha_c = 3.7 \text{ mm}^{-1}$ ， $\alpha_a = 1.0 \text{ mm}^{-1}$ （808 nm）， $\alpha_c = 0.15 \text{ mm}^{-1}$ ， $\alpha_a = 0.15 \text{ mm}^{-1}$ （888 nm）。

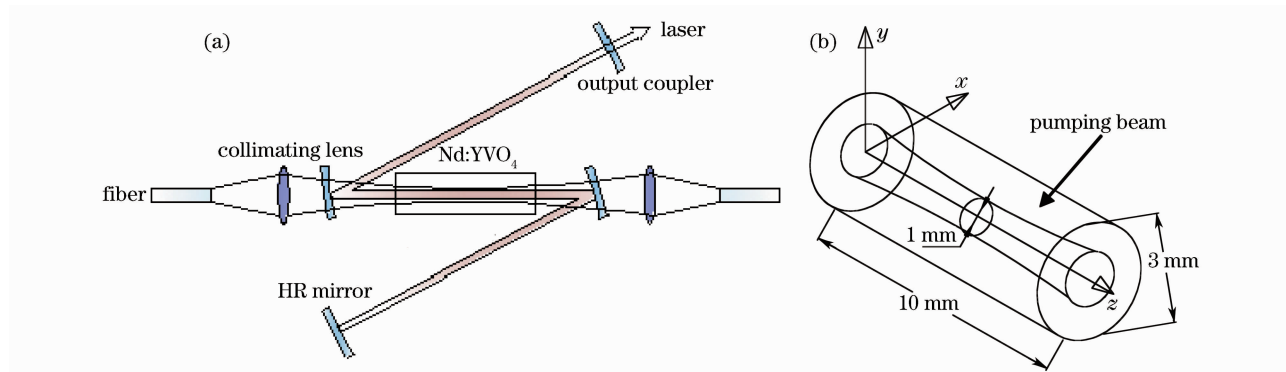


图3 热分析采用的谐振腔结构(a)及抽运模型(b)示意图

Fig. 3 Resonant setup (a) and pumping model (b) in thermal analysis

首先假设光纤耦合输出的抽运光无偏振态，此时晶体 a, c 两轴上的光强分配比例相同。根据上述给出的晶体参数，利用 Lascad 有限元软件，模拟出了 808 nm 和 888 nm 抽运时，Nd:YVO₄ 晶体热负载分布(图 4)和温度分布图(图 5)。掺杂原子数分数为 1%，长度为 10 mm 的 Nd:YVO₄ 能够将 60 W 的 808 nm 抽运光完全吸收，而对于 888 nm 附近波长，吸收只有 80%，为了对比的准确性，将 888 nm 抽运功率提高到 78 W，即每端为 39 W，这样吸收功率也为 60 W。从图中可以看出，在相同的吸收功率下，808 nm 抽运光在进入晶体很短的距离内就被吸收了，大量的热集中在晶体端面，端面中心最高温度达到 550 K，端面径向温度差为 252 K；而 888 nm 抽运时，由于晶体吸收系数较小，使得抽运光在晶体内均匀吸收，相应产生均匀的热分布，晶体端面中心最高温度下降到 352 K，端面径向温度差变为 54 K。由此可见，888 nm 相比于 808 nm 抽运，温度梯度大幅减小。

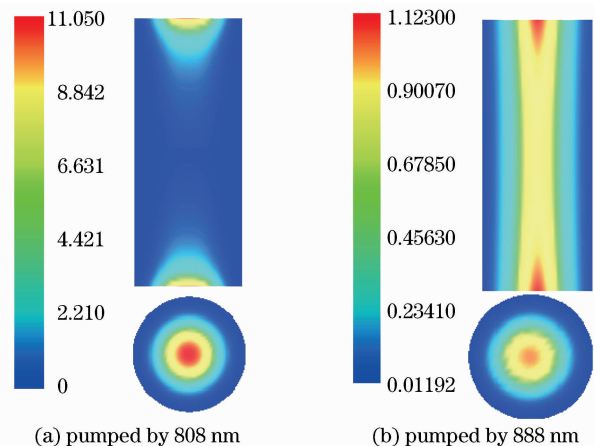


图4 晶体内部热负载分布

Fig. 4 Crystal internal heat load distribution

热应力是导致晶体损伤的主要原因，而热应力是一个 2 阶张量，具有 9 个分量，通过热应力计算结果，选择最大也最具代表性的两个热应力分量，即沿 Nd:YVO₄ 晶体中心平行 c 轴的体积元上(参见图 6

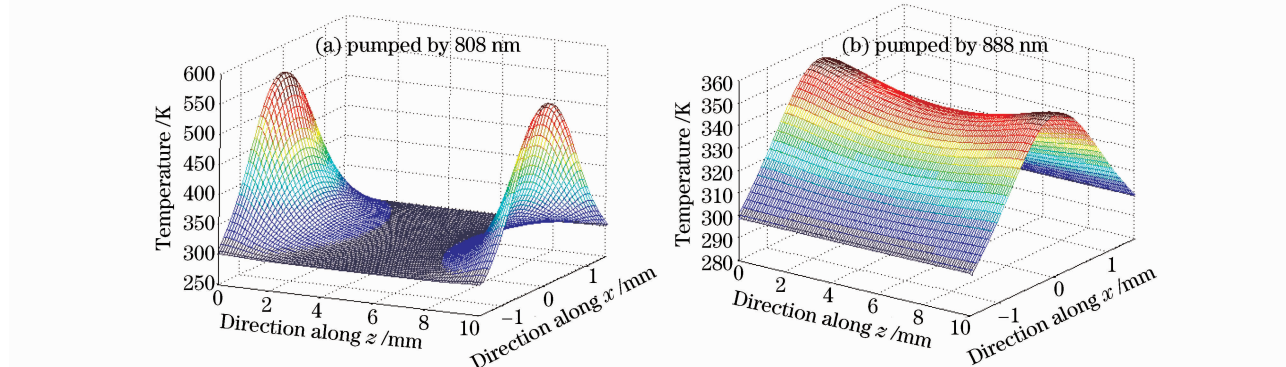


图5 晶体内部温度分布

Fig. 5 Temperature distribution in crystal

阴影所示),沿 x, y 两方向的热应力进行分析。图 7 和图 8 为晶体在 808 nm 和 888 nm 抽运波长下,上述体积元分别沿 x 和 y 方向的热应力分布图,图中正值表示拉伸应力,负值表示压缩应力。

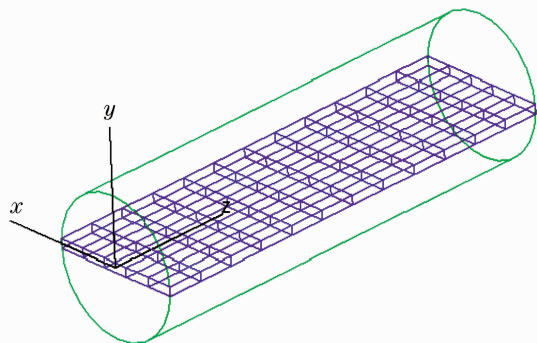


图 6 晶体应力分析体积元取向示意图

Fig. 6 Schematic diagram of crystal orientation about stress analysis

通过分析晶体的热应力图可以看到,在 808 nm 抽运时,热应力集中在晶体表面,晶体中部由于吸收热量很少,因此热应力几乎为零(如图 7);而在 888 nm 抽运下,热应力分布于整个晶体内(如图 8),

同样是晶体外层受到拉伸应力,晶体内部受到压缩应力,但与 808 nm 抽运不同的是,应力的极大值下降了很多, x 方向应力范围从 $-61.9 \sim 72.1 \text{ N/mm}^2$ 变为 $-16.8 \sim 18.6 \text{ N/mm}^2$, y 方向应力范围从 $-46.4 \sim 77.8 \text{ N/mm}^2$ 变为 $-14.6 \sim 21.2 \text{ N/mm}^2$,最大拉伸应力都出现在晶体表面。也就是说,在 888 nm 抽运时,整个晶体内热应力分布均匀且小,因此在大功率抽运下,可以使晶体远离应力破碎极限,避免损坏。

光纤耦合输出的抽运光,其偏振态在很大程度上依赖于光纤的旋转、弯曲和缠绕,这些都是不易控制的^[6],因此外界条件的变化可能随时会导致光纤输出偏振态的变化。对于 808 nm 抽运, Nd:YVO₄ 晶体在其 a 轴和 c 轴上吸收系数相差很大,因此偏振态转动或部分退偏将造成抽运光在晶体的两个轴方向上吸收比例明显改变;而 Nd:YVO₄ 晶体在 888 nm 抽运时,对抽运光的偏振特性不敏感。下面利用 Lascad 软件对 808 nm 和 888 nm 抽运时,偏振特性对 Nd:YVO₄ 晶体温度分布及影响热焦距的情况进行分析。

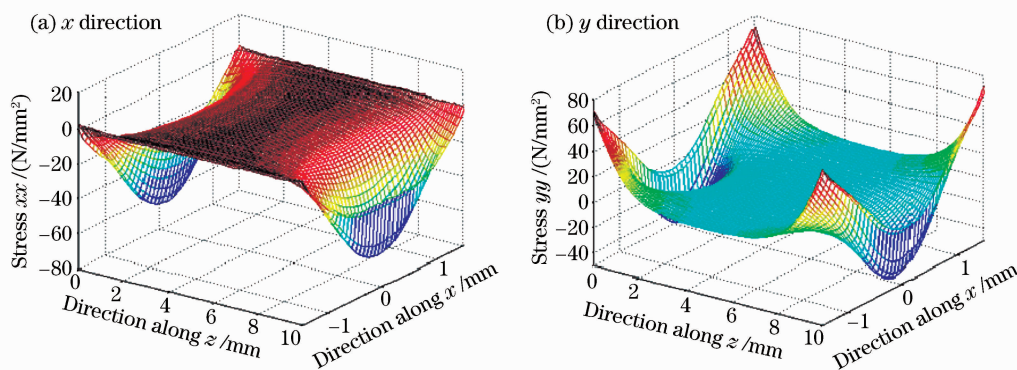


图 7 808 nm 抽运下 x, y 方向的热应力分布

Fig. 7 x, y direction stress distributions under 808 nm pumping

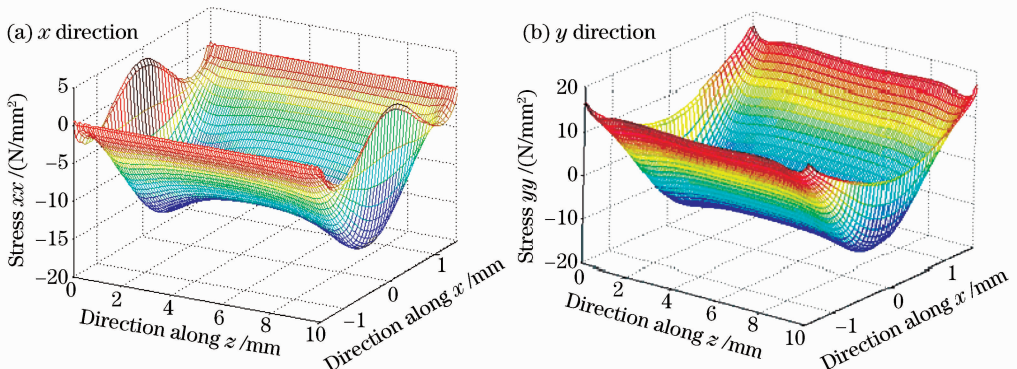
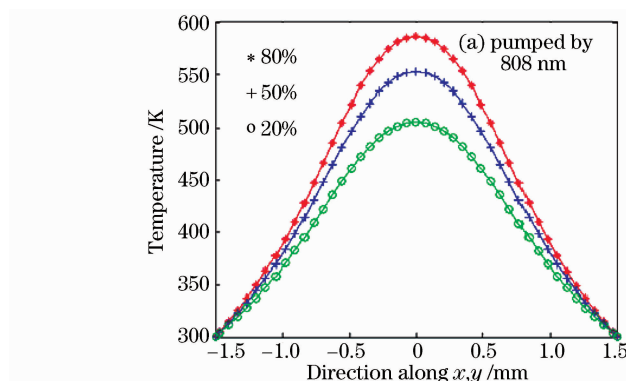


图 8 888 nm 抽运下 x, y 方向的热应力分布

Fig. 8 x, y direction stress distributions under 888 nm pumping

图 9(a)为 808 nm 抽运情况,当平行于 c 轴偏振光分量为 80% (* 曲线)时,由于平行于 c 轴的吸收

系数大,抽运光在很短的距离内被吸收,因而端面温度很高,中心温度达到586.5 K;当平行于 c 轴偏振光分量为 50% (+ 曲线) 时,端面中心温度为 552.8 K;当平行于 c 轴偏振光分量为 20% (o 曲线),其余大部分抽运光偏振态平行于 a 轴,吸收系数小,因此在端面温度较低,中心温度为 505.4 K。可见由于抽运光偏振态的变化,导致了晶体对 808 nm 抽运光吸收的变化,从而使晶体温度分布也发生变化,这些都会导致谐振腔的不稳定以及输出功率的变化。图 9(b) 为 888 nm 抽运光偏振态按同



样比例变化时,晶体端面的温度曲线。由于在 888 nm 吸收峰处,晶体 a 轴和 c 轴的吸收系数都近似为 0.15 mm^{-1} ,因此当抽运光偏振态发生变化时,两个方向上的吸收长度相同,晶体温度分布基本没有变化,端面中心温度为 352 K,表现出对偏振光的不敏感性,从而使谐振腔和输出功率保持稳定。

另外,通过软件可以计算出由于温度梯度的变化造成的热焦距变化。表 1 是利用 Lascad 软件计算得到的抽运光偏振态对热透镜焦距的影响。

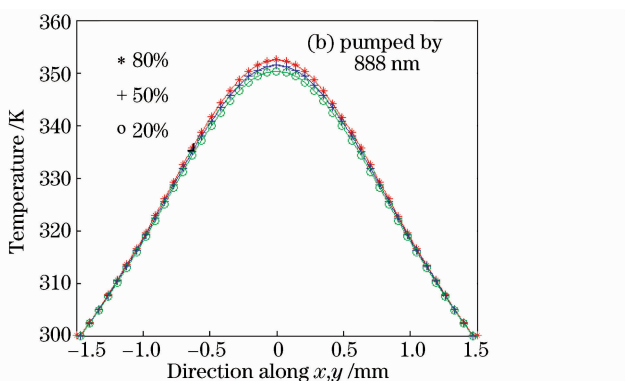


图 9 抽运光偏振分量(平行于 c 轴)与晶体的温度分布

Fig. 9 Pumped optical polarization (parallelize c) on crystal temperature distributions

表 1 抽运光偏振分量与 Nd:YVO₄ 热焦距

Table 1 Pumped optical polarization components and Nd:YVO₄ thermal focal length

Pumped optical horizontal components ratio	80%	50%	20%
808 nm x - z thermal focal length /mm	101.66	116.95	127.76
y - z thermal focal length /mm	109.11	122.98	132.16
888 nm x - z thermal focal length /mm	254.26	254.29	254.26
y - z thermal focal length /mm	250.24	250.26	250.25

从表 1 看出,随着抽运光偏振态的改变,808 nm 抽运下热焦距值变化明显,而在 888 nm 抽运下,热焦距值保持不变。热透镜是影响谐振腔设计的一个重要因素,热焦距的不确定会对设计带来很多困难,并且对激光器的稳定性和输出功率造成不利影响。

4 结 论

采用 Lascad 软件模拟了 808 nm 和 888 nm 两种

波长抽运下晶体的温度和热应力分布以及抽运光偏振态对热透镜焦距的影响。结果表明,虽然 Nd:YVO₄ 对 888 nm 抽运吸收系数很小,但可以通过增加晶体长度,使抽运光得到充分吸收,并且晶体温度梯度较小,热分布均匀,有利于实现高功率抽运;由于 Nd:YVO₄ 在 888 nm 处 a 轴和 c 轴吸收系数相同,因此表现出对抽运光偏振态吸收的不敏感性,有利于激光谐振腔和输出的稳定。

参 考 文 献

- 1 B. A. Thompson, A. Minassian, M. J. Damzen. Unidirectional single-frequency operation of a Nd:YVO₄ ring laser with and without a Faraday element [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(15): 3174~3177
- 2 Xiaoyuan Peng, Anand Asundi, Yihong Chen *et al.*. Study of the mechanical properties of Nd:YVO₄ crystal by use of laser interferometry and finite-element analysis [J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(9):1396~1403
- 3 Yao Yi, Qu Dapeng, Zheng Quan. Laser diode-pumped Nd:YVO₄/LBO 543 nm all-solid-state laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7):1740~1743
- 姚 矣,曲大鹏,郑 权. LD 抽运 Nd:YVO₄/LBO 543 nm 全固态激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7):1740~1743
- 4 Tao Li, Zhuang Zhuo, Xiaomin Li *et al.*. Study on optical characteristics of Nd:YVO₄/YVO₄ composite crystal laser [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(3):175~177
- 5 Louis McDonagha, Ralf Knappeb, Achim Nebelb *et al.*. 888 nm

- pumping of Nd:YVO₄ for high-power high-efficiency TEM₀₀ lasers [C]. *SPIE*, 2007, **6451**:64510F
- 6 L. McDonagh, R. Knappe, A. Nebel. Enhanced Optical Pumping of Materials Exhibiting Polarization-Dependent Absorption [P]. U. S. Patent, 025,811,7 A1, 2004
- 7 E. Cheng, D. Dudley, W. Nighan *et al.*. Lasers with Low Doped Gain Medium [P]. U. S. Patent, 6,185,235, 2001
- 8 Louis McDonagh, Richard Wallenstein. High-efficiency 60 W TEM₀₀ Nd:YVO₄ oscillator pumped at 888 nm [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(22):3297~3299
- 9 W. A. Clarkson, D. C. Hanna. Efficient Nd:YAG laser end-pumped by a 20 W diode-laser bar [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(12):869~871
- 10 Tang Hao, Zhu Xiaolei, Meng Junqing *et al.*. High repetition rate short pulse width LGS electro-optic Q-switched Nd:YVO₄ laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1):137~141
唐昊,朱小磊,孟俊清等.高重复频率窄脉宽LGS电光调Q Nd:YVO₄激光器[J].*光学学报*, 2010, **30**(1):137~141
- 11 Shi Peng, Li Long, Gan Ansheng. Thermal analysis of rectangular Nd:YVO₄ crystal by laser diode side-pumped [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(2):176~180
史彭,李隆,甘安生.激光二极管侧抽运长方形Nd:YVO₄激光晶体热分析[J].*中国激光*, 2007, **34**(2):176~180