

文章编号: 0258-7025(2009)06-1332-05

输出功率 12.9 W 的全固态连续 TEM₀₀ 模绿光激光器

李凤琴 于 琳 申玉梅 郑耀辉 张宽收 彭堃堦

(山西大学光电研究所量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西 太原 030006)

摘要 选择低掺杂浓度的 Nd:YVO₄/YVO₄ 复合晶体, 设计了 V 字型热不灵敏折叠式谐振腔, 利用 I 类非临界相位匹配 LBO 非线性晶体倍频, 当抽运功率为 30 W 时, 获得连续单横模绿光最高输出功率 12.9 W, 光-光转换效率为 43%。当输出功率为 11.7 W 时, 测量其长期功率稳定性优于 ±0.83% (自由运转 3 h), 光束质量传输因子 M^2 小于 1.5。

关键词 激光器; 单横模; 腔内倍频; 折叠式谐振腔

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093606.1332

All-Solid-State CW 12.9 W TEM₀₀ Mode Green Laser

Li Fengqin Yu Lin Shen Yumei Zheng Yaohui

Zhang Kuanshou Peng Kunchi

(State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Optoelectronics, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China)

Abstract A CW laser consisting of a low-doped Nd:YVO₄/YVO₄ composite crystal and an I-type phase-matching LBO frequency-doubler with a three-mirror V-fold thermal unsensitivity resonator is designed and constructed. A maximal output power of 12.9 W at 532 nm wavelength is obtained under a pump power of 30 W with an optical-optical conversion efficiency of 43%. The long term intensity fluctuation over 3 hours free-operation and the beam transfer factor M^2 measured at the output power of 11.7 W were less than ±0.83% and 1.5, respectively.

Key words lasers; TEM₀₀ mode; intracavity frequency doubling; V-fold-structure cavity

1 引 言

与传统抽运方式相比, 全固态端面抽运固体激光器(LDPL)具有输出光束质量好、结构简单紧凑、寿命长等优点。但是, 随着抽运功率的提高, 激光晶体受热不均匀而产生热透镜效应和端面变形, 严重影响了激光输出功率和光束质量的提高, 而且易导致端面损伤和镀膜损坏。目前, 通过采用复合晶体改善热效应的技术在国内外已经得到了应用^[1,2]。相对于传统的单一激光晶体, 复合晶体的端面部分没有掺杂离子, 可以充当一个很好的导热体, 能够将累积在激光晶体中的热及时带走, 减少了激光晶体中心和侧面间的温度梯度, 减弱了由于棒的端面热膨胀而产生的热透镜效应。根据文献[3]报道, 复

合晶体中的峰值温度和热应力比非复合晶体减少了约 70%, 从而具有很大的改善光束质量的能力。另外, 由于 532 nm 激光处于人眼最敏感的光波长区域, 可广泛应用于激光准直、医疗、印刷、标记等方面, 5 W 以上的全固态绿光激光器可作为钛宝石晶体的抽运源, 实现稳定的激光输出, 因此, 激光二极管(LD)抽运全固态连续高功率绿光激光器一直是国际上关注的焦点。Nd:YVO₄ 晶体是双折射晶体, 吸收系数和增益都较高, 因此, 目前高功率 Nd:YVO₄ 绿光激光器的研究工作进展很快。2000 年, 何京良等^[4]实现了 Nd:YVO₄ 腔内倍频 8.8 W 的连续绿光输出, 光-光转换效率为 31.5%; 2004 年, Bai Yang 等^[5]采用 Nd:YVO₄/LBO 腔内倍频, 得到 9.9 W 连

收稿日期: 2008-08-04; 收到修改稿日期: 2008-12-24

基金项目: 国家自然科学基金(60527003)和国家自然科学基金创新研究群体(60821004)资助课题。

作者简介: 李凤琴(1977—), 女, 博士研究生, 主要从事全固态激光器方面的研究。E-mail: lfq@sxu.edu.cn

导师简介: 彭堃堦(1936—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事量子光学与固体激光技术方面的研究。

E-mail: kcpeng@sxu.edu.cn

续绿光输出,光-光转换效率达到34.8%;2007年,李晓敏等^[6]则采用Nd:YVO₄/YVO₄复合晶体,KTP晶体腔内倍频,抽运功率为17 W时,得到6 W的高功率TEM₀₀绿光输出,光-光转换效率达37%。本文采用Nd:YVO₄/YVO₄复合晶体,降低了激光晶体的热透镜效应,优化设计激光谐振腔结构,当抽运功率为30 W时,获得连续单横模绿光最高输出功率12.9 W,光-光转换效率为43%。当输出功率为11.7 W时,测量其长期功率稳定性优于±0.83%(自由运转3 h),光束质量传输因子M²小于1.5。

2 高功率连续单横模绿光激光器的热效应分析及谐振腔设计

在激光二极管端面抽运固体激光器中,激光晶体吸收抽运光产生激光辐射的同时,部分抽运功率转换成热,外部冷却使热扩散,从而在激光介质的内部形成一个热梯度,具有与透镜类似的作用,称为热透镜效应。这种热透镜效应对实现高功率稳定运转的激光器影响较大。由文献[7]可知当激光器稳定运转时,在激光晶体的内部形成一个稳定的温度场分布

$$K_x \frac{\partial^2 T(x, y, z)}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 T(x, y, z)}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 T(x, y, z)}{\partial z^2} + q(x, y, z) = 0, \quad (1)$$

其中, x, y, z 方向分别表示激光晶体的通光端面方向和抽运光中心方向, K_x, K_y, K_z 分别为 x, y, z 方向激光晶体的热导率, $q(x, y, z)$ 为激光晶体内部单位体积的热功率密度。由晶体内部温度梯度产生热透镜效应而引起的总光程差可以表示为

$$\Delta_{\text{OPD}}(x, y) = n_0 \nabla l + \int_0^l \frac{\partial n}{\partial T} T(x, y) dz + \sum_{i,j=1}^3 \frac{\partial n}{\partial \epsilon_{i,j}} \epsilon_{i,j}(x, y) dz, \quad (2)$$

其中,第一项表示由于热膨胀过程而造成的端面变形带来的光程差,第二项表示由于激光晶体折射率随温度的变化而在激光晶体内部形成的类似于透镜的光程差,由于Nd:YVO₄本身具有很强的自然双折射特性,所以第三项应力双折射带来的影响很小,可以忽略不计,则激光晶体的热透镜焦距可以近似表示为

$$f(x, y) = (x^2 + y^2) / 2[\Delta_{\text{OPD}0} - \Delta_{\text{OPD}}(x, y)]. \quad (3)$$

在本实验中,晶体的两个通光端面与空气相接

触,由于经端面与空气热交换流出的热量远远小于从晶体侧面通过热传导流出的热量,可假设晶体的两个端面满足绝热条件。掺杂原子数分数为0.5%的复合晶体Nd:YVO₄+YVO₄,尺寸为3 mm×3 mm×8 mm+3 mm×3 mm×5 mm,当抽运光聚焦点光斑半径 w_p 约为325 μm,经过数值计算得到抽运功率为30 W时复合晶体内部的三维温度分布,并且在同等条件下与同样掺杂浓度的3 mm×3 mm×8 mm的单一Nd:YVO₄晶体作比较,如图1所示。可以看出,激光晶体中心温度比较高,边缘温度比较低,呈抛物线形分布。在30 W抽运功率的条件下,单一晶体的中心温度为558 K,复合晶体的中心温度为408 K,与单一晶体相比,复合晶体由于其非复合部分的散热作用,在30 W抽运功率的条件下,其中心温度比单一晶体降低了150 ℃。由此可见,采用复合晶体以后,大大降低了Nd:YVO₄晶体的内部温度和热应力,不仅能有效地避免由于晶体温升导致的端面膜层被损坏的现象,而且可以有效地降低高功率激光器中的热透镜效应,尽量减小激光晶体热透镜焦距对激光器谐振腔的稳定性、振荡激光腔模尺寸、模间耦合效率和输出

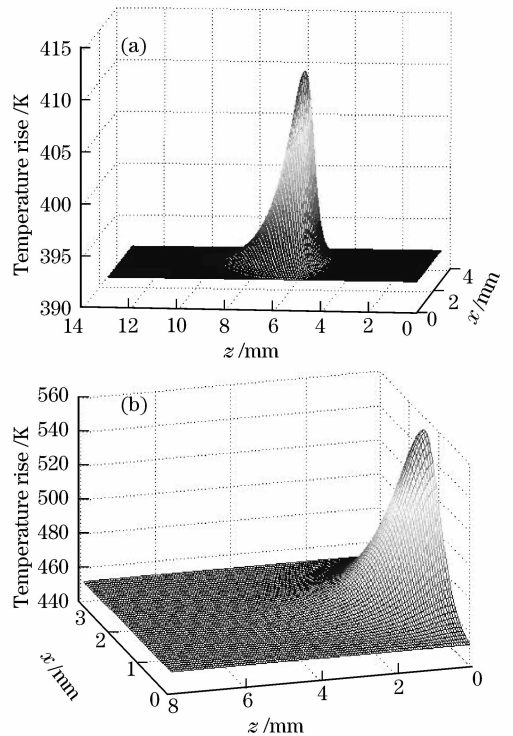


图1 复合晶体(a)和单一晶体(b)在30 W抽运功率下的三维温度分布图

Fig. 1 Temperature distributions in the composite crystal (a) and the conventional crystal (b) under 30 W pumped load

光束质量等的影响。近年来,随着冷却技术与控温技术的提高,Nd:YVO₄晶体在高功率激光器中得到越来越广泛的应用,然而在高功率激光器中由于其掺杂浓度不同,表现的热透镜效应也明显不同。如图2所示,当抽运功率为30 W时,数值计算得到不同掺杂浓度的复合晶体在抽运光中心方向 z 轴上温度分布有所不同,低掺杂浓度的晶体中心温升小,这样,其端面变形相对于高掺杂浓度的晶体将会变小。可见,在高功率激光器的设计中,选用低掺杂浓度的复合晶体也是减小激光晶体热效应的有效途径之一。图3为掺杂浓度为0.3%的Nd:YVO₄/YVO₄复合晶体热焦距随抽运功率的变化曲线图,从图中可以看出,理论计算值与实验测量值基本吻合。

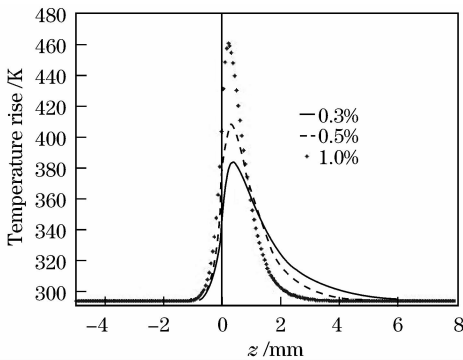


图2 不同掺杂原子数分数复合晶体在抽运光中心方向 z 轴的温度分布

Fig. 2 Temperature distributions of different doped composite laser crystals at the central direction of the pump laser along z axis

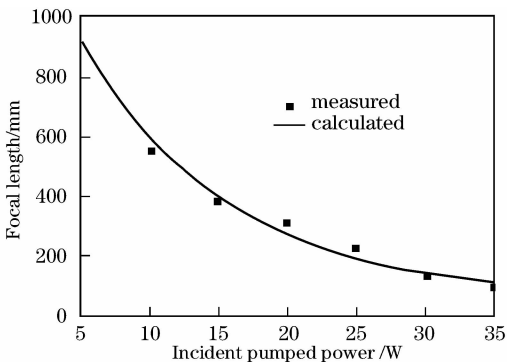


图3 Nd:YVO₄/YVO₄晶体的热焦距随抽运功率的变化曲线

Fig. 3 Focal length of thermal lens in Nd:YVO₄/YVO₄ composite crystal versus different pump powers

在实验中,采用如图4所示的V型折叠式谐振腔结构,在折叠角足够小的情况下,像散可以忽略,可将折叠腔展开成为多元件直腔来分析^[8]。经过数

值计算得到不同腔长和热焦距下激光谐振腔的稳定性参数、基频光在激光晶体及倍频晶体处的束腰变化曲线,如图5~7所示,为得到热不灵敏谐振腔和较高的倍频效率提供了理论依据。从图中可以看出,激光晶体的热焦距越长,激光谐振腔的稳定区域越大,而且,激光晶体处的基频光束腰半径随着腔长的变化越小,越有利于在不同的抽运功率下实现最佳模式匹配,提高激光转换效率。

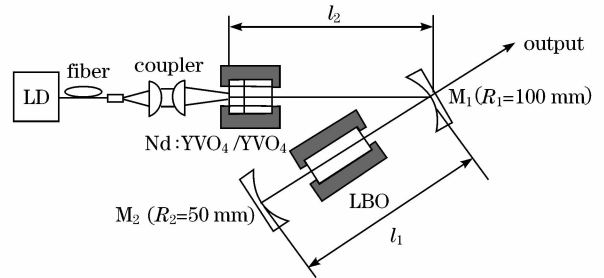


图4 实验装置图

Fig. 4 Experimental setup

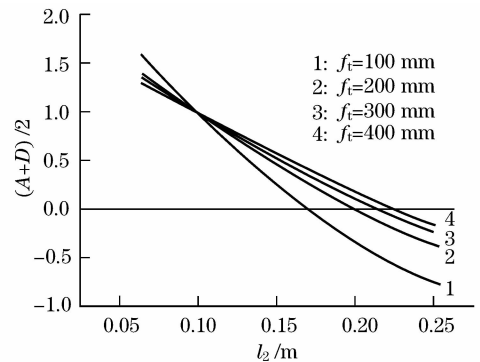


图5 $l_1=108$ mm,不同热焦距下稳定性参数 $(A+D)/2$ 随 l_2 的变化曲线

Fig. 5 Parameter of $(A+D)/2$ as a function of cavity length l_2 under different thermally induced lens with $l_1=108$ mm

3 实验装置与实验结果分析

高功率激光二极管端面抽运Nd:YVO₄/YVO₄复合晶体TEM₀₀模绿光激光器的实验装置如图4所示,抽运源是光纤耦合输出最大功率为30 W的激光二极管,光纤直径为400 μ m,数值孔径(NA)为0.22。激光二极管输出的抽运光经过两个焦距分别为30 mm和50 mm的平凸透镜组成的聚焦系统(传输效率约85%),抽运光在增益介质中的聚焦点光斑直径约650 μ m,其最佳位置为进入掺杂部分Nd:YVO₄晶体约2~3 mm处。为了减小激光晶体的热透镜效应对激光谐振腔的影响以及热致损伤

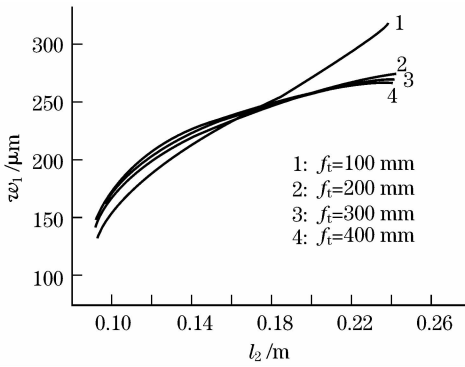


图 6 $l_1 = 108$ mm, 不同热焦距下激光晶体处光斑 ω_1 随 l_2 的变化曲线

Fig. 6 Waist ω_1 of laser at laser crystal as a function of cavity length l_2 under different thermally induced lens with $l_1 = 108$ mm

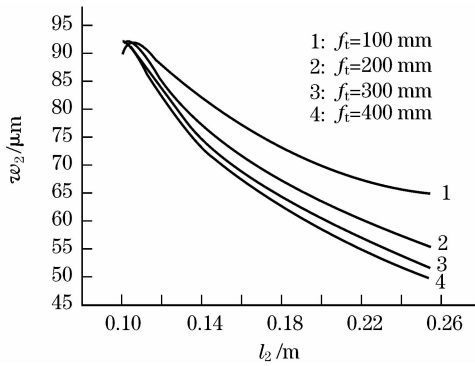


图 7 $l_1 = 108$ mm, 不同的热焦距下倍频晶体处光斑 ω_2 随 l_2 的变化曲线

Fig. 7 Waist ω_2 of laser at nonlinear crystal as a function of cavity length l_2 under different thermally induced lens with $l_1 = 108$ mm

现象, 采用的 Nd:YVO₄/YVO₄ 复合晶体的结构是由掺杂原子数分数为 0.3%, 尺寸为 3 mm × 3 mm × 8 mm 的 Nd:YVO₄ 晶体前表面键合 3 mm × 3 mm × 5 mm 的非掺杂部分 YVO₄ 组成, YVO₄ 的一面镀 1064 nm 高反膜和 808 nm 增透膜, 作为谐振腔的输入镜, Nd:YVO₄ 的一面镀 1064 nm 减反膜, 以减小振荡激光在腔内的损耗。图 3 中给出不同抽运功率下该晶体的热焦距曲线图, 从图中可以看出当抽运功率为 30 W 时, 其热焦距大约为 150 mm。激光晶体侧面用铝箔包裹放在紫铜夹具中, 用半导体温控装置加冷却循环水对晶体进行严格控温, 控温精度为 ±0.01 °C, 在本实验中, 复合晶体的表面温度保持在 20.50 °C。输出耦合镜 M₁ 的曲率半径为 100 mm, 凹面镀 532 nm 增透膜和 1064 nm 高反膜, 平面镀 532 nm 减反膜; 腔镜 M₂ 的曲率半径为 50 mm, 凹面镀 532 nm 和

1064 nm 双色高反膜; 作为输入镜的复合晶体前表面距离输出镜 M₁ 为 195 mm; 腔镜 M₁, M₂ 之间的距离为 108 mm; 考虑热焦距时, 计算得到基频光在激光晶体处的腰斑半径约 260 μm, 符合高功率抽运时最佳模式交叠的条件^[9]。实验中, 选用 I 类非临界相位匹配的 LBO 作为倍频晶体, 相位匹配角 $\theta_m = 90^\circ$, 通过控制倍频晶体的温度来实现相位匹配, 尺寸为 3 mm × 3 mm × 22 mm, 两端均镀 1064 nm 和 532 nm 双色减反膜, 置于紫铜夹具中, 用半导体制冷器结合自制的高温温控仪进行严格控温, 控温精度优于 ±0.03 °C, 最佳匹配温度保持在 148 °C 左右。另外, 高效率的腔内倍频还取决于激光器腔内基波的光束质量、功率密度, 对于连续波基波振荡器, 腔内功率密度远大于腔外, 而二次谐波的功率与基波功率的平方成正比, 因此在倍频时应将倍频晶体置于腔内束腰位置处。而且, 基频光单向通过倍频晶体时转换效率较低, 所以, 在实验中采用所谓的腔内双通倍频方式, 即基波往返两次通过晶体的倍频光一起耦合输出, 则输出功率与转换效率将大大提高。

实验测量得到的绿光输出功率随抽运功率的变化曲线如图 8 所示, 可以看出, 当抽运功率在 10~30 W 之间时, 输出绿光功率随抽运功率基本呈线性变化, 也就是说激光谐振腔基本是热不灵敏的。当抽运功率为 30 W 时, 得到最大单横模绿光输出功率为 12.9 W, 激光器的光-光转换效率为 43%, 没有出现饱和现象, 如果继续增加抽运功率, 有可能提高输出功率。而且, 在同等条件下采用单一的 Nd:YVO₄ 晶体作为激光介质, 得到最大 10 W 的绿光输出, 并且当抽运功率大于 30 W 时, 绿光输出出现轻微的饱和现象。图 9 为采用复合激光晶体以后绿光输出功率为 11.7 W 时测量得到的长期功率稳

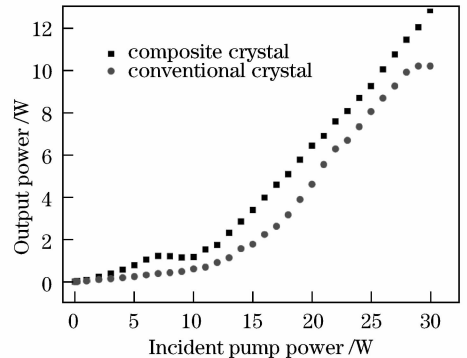


图 8 绿光输出功率随抽运功率的变化曲线
Fig. 8 Output power of the green laser as a function of the incident pump power

定性曲线图,其长期功率稳定性优于 $\pm 0.83\%$ (自由运转 3 h),即激光输出 3 h 内的功率波动小于 200 mW。使用德国 Spiricon 公司生产的 Model M^2 -200 光束质量分析仪测量输出绿光的光束质量因子 M^2 小于 1.5,其光强远场分布如图 10 所示。图 11 为全固态高功率单横模绿光激光器样机图片。

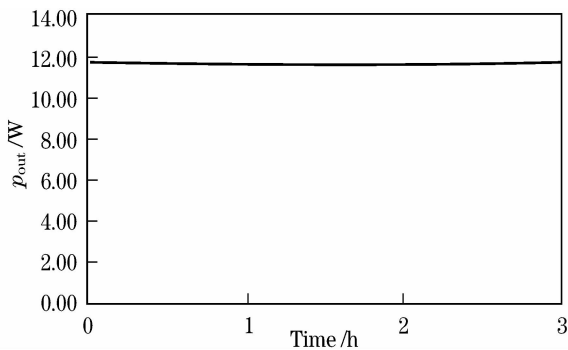


图 9 长期功率稳定性曲线

Fig. 9 Long-term stability of output power at 532 nm

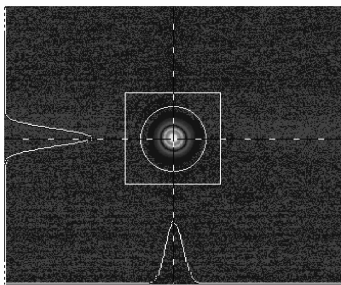


图 10 绿光光强远场分布图

Fig. 10 Beam quality of the green laser in the far field



图 11 激光器样机图片

Fig. 11 Photographs of a laser sample

敏腔,在 30 W 的抽运功率下,采用低掺杂浓度的复合晶体,获得连续单横模绿光最高输出功率为 12.9 W,光-光转换效率为 43%。当输出功率为 11.7 W 时,测量其长期功率稳定性优于 $\pm 0.83\%$ (自由运转 3 h),光束质量传输因子 M^2 小于 1.5。现已完成了全固态高功率单横模绿光激光器样机的研制,将其作为自制连续钛宝石激光器的抽运源,获得输出功率 900 mW,中心波长为 773 nm 稳定的单频激光输出。

参 考 文 献

- Eric C. Honea, Raymond J. Beach, Seven Sutton *et al.*. 115 W Tm : YAG diode-pumped solid-state laser [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1997, **33**(9): 1592~1599
- Wang Junying, Zheng Quan, Xue Qinghua *et al.*. 1.1 W CW output all-solid-stated blue laser at 473 nm [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(5): 523~526
王军营, 郑 权, 薛庆华 等. 1.1 W 连续输出 473 nm 全固态蓝光激光器[J]. 中国激光, 2004, **31**(5): 523~526
- A. Lucianetti, Th. Graf, R. Weber *et al.*. Thermo-optical properties of transversely pumped composite YAG rods with a Nd-doped core[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2000, **36**(2): 220~227
- He Jingliang, Hou Wei, Zhang Hengli *et al.*. 8.8 W green laser by intracavity frequency doubling of a LD pumped Nd : YVO₄ laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**(6): 481~484
何京良, 侯 玮, 张恒利 等. LD 抽运 Nd : YVO₄ 腔内倍频连续波 8.8 W 绿光激光器 [J]. 中国激光, 2000, **A27**(6): 481~484
- Bai Yang, Li Long, Chen Haowei *et al.*. Continuous-wave green laser of 9.9 W by intracavity frequency doubling in laser diode single-end-pumped Nd : YVO₄/LBO [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2004, **21**(8): 1532~1534
- Li Xiaomin, Zhuo Zhuang, Li Tao *et al.*. Laser diode-pumped Nd : YVO₄/ YVO₄ composite crystal laser [J]. *Chinese J. Lasers* 2007, **34**(1): 41~44
李晓敏, 卓 壮, 李 涛 等. 激光二极管抽运 Nd : YVO₄/ YVO₄ 复合晶体激光器 [J]. 中国激光, 2007, **34**(1): 41~44
- Zhuang Zhuo, Tao Li, Xiaoming Li *et al.*. Investigation of Nd : YVO₄/ YVO₄ composite crystal and its laser performance pumped by a fiber coupled doubled laser [J]. *Opt. Commun.*, 2007, **274**(1): 176~181
- Lü Baida. Laser Optics [M]. 2nd Edilion, Chengdu: Sichuan University Press, 1992. 292~295
吕百达. 激光光学 [M]. 第二版, 成都: 四川大学出版社, 1992. 292~295
- Paolo Laporta, Marcello Brussaard. Design criteria for mode size optimization in diode-pumped solid-state lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1991, **27**(10): 2319~2326

4 结 论

分析了激光晶体的热透镜效应,设计了热不灵