

文章编号: 0253-2239(2001)03-0274-04

激光二极管抽运 Nd: YVO₄/LBO 红光激光器研究

张恒利¹⁾ 竺乃宜¹⁾ 杨乾锁¹⁾ 余西龙¹⁾ 侯 玮²⁾ 许祖彦²⁾ 吴柏昌³⁾

1), 中国科学院力学研究所高温气体动力学开放实验室, 北京 100080

2), 中国科学院物理研究所光物理实验室, 北京 100080

3), 中国科学院福建物质结构研究所 福州 350002

摘要: 报道了激光二极管抽运的 Nd: YVO₄ 晶体 LBO 晶体 II 类非临界相位匹配腔内倍频大功率红光激光器。通过对激光晶体热效应的考虑, 设计了热不灵敏腔, 采用低掺杂浓度 Nd: YVO₄ 晶体, 获得了 671 nm 红光的最高输出为 890 mW。

关键词: 激光二极管; 抽运; 腔内倍频

中图分类号: TN248.1 文献标识码: A

1 引 言

全固态大功率红光激光器在医疗、彩色显示等方面具有巨大的应用前景, 也可作为 Cr: LiSAF 类晶体的抽运源。目前红光激光二极管的功率虽有较大提高, 但是相对于固体激光器来说其亮度小、光束质量差、线宽宽。通过光参量和和频过程, Bosenberg 等^[1] 利用周期性超晶格铌酸锂(PPLN) 得到 2.5 W 红光激光输出, 但该系统技术复杂, 且周期性超晶格铌酸锂难加工, 厚度小, 成品率低, 目前还难以实用化。

倍频钕离子的 1.3 μm 谱线是得到红光的一种有效途径。Lincoln 等^[2] 利用 LBO 晶体 I 类临界相位匹配在激光二极管抽运 Nd: YLF 激光器中得到 300 mW 的 659 nm 激光(声光调 Q) 输出作为 Cr: LiSAF 自锁模飞秒激光器的抽运源。Huo 等^[3] 在激光二极管抽运 Nd: YAP 激光器中, 获得 95 mW 红光输出, 然后抽运 Cr: LiSAF 得到连续近红外输出。Nd: YVO₄ 晶体在 1.3 μm 谱线上具有较大的发射截面和较高的分支比^[4,5]。王长青等^[6] 用激光二极管抽运 Nd: YVO₄ 激光器, 在吸收抽运功率为 515 mW 时获得 3.6 mW 的 671 nm 激光输出。Conroy 等^[7] 在激光二极管抽运 Nd: YVO₄ 微片激光器时, 利用 LBO 腔内倍频得到 10 mW 稳定的 671 nm 激光输出。在大功率激光二极管抽运下, Agnesi 等^[8] 获得了 430 mW 的 671 nm 激光输出。

我们从 1997 年开始对大功率激光二极管抽运

Nd: YVO₄ 晶体全固态红光激光器进行研究, 并利用 KTP 晶体和 I 类非临界相位匹配的 LBO 晶体腔内倍频, 分别获得超过 270 mW 和 500 mW 的 671 nm 激光输出^[9,10]。本文报道了在激光二极管抽运 Nd: YVO₄ 晶体, II 类非临界相位匹配 LBO 晶体腔内倍频红光激光器中, 通过对激光晶体热透镜效应的考虑, 设计了热不灵敏腔, 采用低掺杂浓度 Nd: YVO₄ 晶体, 671 nm 红光的最高输出为 890 mW。

2 激光晶体的热透镜效应

在高功率激光二极管端面抽运固体激光器中, 激光晶体的热效应是不能获得高效率、高功率输出的一个重要因素。热的影响主要为热透镜和热致衍射损耗。本文仅考虑热透镜效应的影响, 因为热透镜效应会极大地改变腔内模式, 甚至使得激光器偏离出稳定工作状态。在较大的抽运功率变化范围内, 设计腔内模式对热透镜效应不敏感的谐振腔型, 是获得稳定高功率激光输出的必要条件。

对连续端面抽运的情况, 在激光振荡束腰远小于晶体尺寸的情况下, 可将方块晶体等效成圆柱状。由于激光晶体侧面由铝箔包裹, 并外由通水紫铜夹具散热, 可看作侧面导热且表面温度稳定在某一温度。在这些近似下及在忽略热应力和形变时, 可由稳态热传导方程, 解出激光晶体的温度分布, 进而可求出近似的等效热透镜焦距^[11]:

$$f = \frac{\pi K_c w_p^2}{P_{in} (dn/dT)} \left| \frac{1}{1 - \exp(-\alpha l)} \right|,$$

式中 $\alpha = 1/\text{mm}$ 为吸收系数, $l = 5 \text{ mm}$ 为晶体的通光长度, P_{th} 为转化为热的抽运功率, w_p 为抽运光斑尺寸, $K_c = 5.4 \text{ W/mK}$ 为晶体的热导率, $dn/dT = 4.7 \times 10^{-6}/\text{K}$ 为晶体折射率的温度变化系数。由于忽略热应力和形变的影响, 实际的热焦距比上式求得的短一些, 也即热致屈光度 [$D = 1/f$ (单位: $1/\text{m}$)] 要大一些。

从上式可以看出抽运光斑尺寸对热焦距的影响是很大的。图 1 为在其它条件相同, 抽运光斑尺寸不同时, 热致屈光度随热功率的变化关系。从图中可以看出, 同样在 4 W 热功率时, 抽运光斑半径 $w_p = 400 \mu\text{m}$ 时, 热致屈光度仅为 $D = 6$, 而在 $w_p = 250 \mu\text{m}$ 时, $D = 18$ 。所以适当加大抽运光斑尺寸, 可以有效地减小热透镜效应的影响。

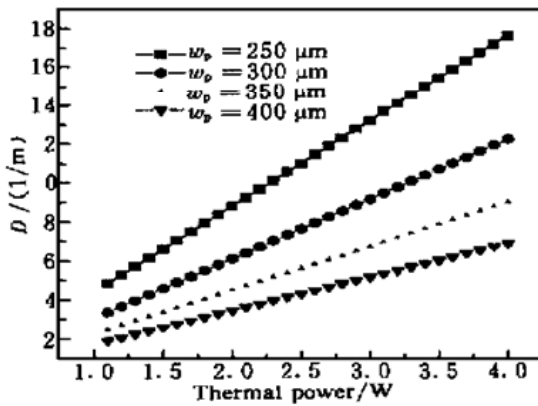


Fig. 1 The thermally induced lens versus thermal power under different pump size

3 激光晶体热透镜效应对折迭腔参数的影响

采用折迭腔可以提高倍频光的转换效率和输出功率。在不考虑像散时, 折迭腔可以展开为多元件直腔来进行分析^[12]。由于在我们的实验中, 激光晶体前表面直接镀膜作为谐振腔的一面端镜, 在一定的抽运功率下, 可根据前面的公式求得其热焦距, 所以可将其等效为一曲率半径为: $R = 2f$ (f 为热透镜焦距) 的凹面镜。以 G 参数等价腔分析法进行分析和数值计算, 可以计算出倍频晶体和激光介质处的光斑半径。图 2 为在不同的腔长和热致屈光度下, 采用 LBO 晶体倍频时, 振荡光束腰在激光晶体和倍频晶体处的束腰变化情况。图中纵坐标 w_1 为激光晶体处束腰, w_2 为倍频晶体处束腰; 横坐标 D 为热致屈光度, L 为倍频晶体所在分臂的腔长。计算时取另一分臂长为 250 mm 。从图中可以看出, 在 $L = 162$

mm 处, 激光晶体和倍频晶体处的束腰大小随热致屈光度的增加变化最小。这就为通过选择合适的腔长以得到热不灵敏腔提供了理论依据。

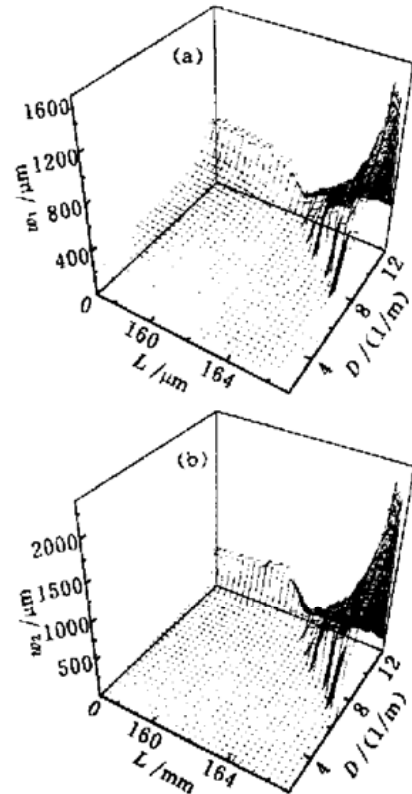


Fig. 2 Waists at lasermaterial (a) and (b) nonlinear crystal are shown as a function of cavity length and thermally induced lens

4 实验装置和结果

实验装置如图 3 所示。抽运源激光二极管的型号为 OPC-B015-809-FCPS, 最大输出功率 15 W ; 耦合系统由两个非球面镜组成, 焦距约 30 mm , 物像比约 $1.5:1$, 可微调, 将光纤输出聚焦耦合到 Nd:YVO₄ 晶体, 耦合效率约 90% ; Nd:YVO₄ 晶体钕离子掺杂的原子数分数为 0.5% 。采用低掺杂的 Nd:YVO₄ 晶体, 可减小吸收系数, 使得抽运光更均匀地分布在激光晶体上, 有利于大功率抽运。激光介质前表面镀 808 nm 增透膜和对 1342 nm 的全反膜, 作为谐振腔的输入镜, 后表面镀 1342 nm 的增透膜, 以减小腔内损耗; Nd:YVO₄ 晶体侧面用铝箔包起来, 置于紫铜夹具内, 并用循环水冷却以保证比较好的热接触, 在实验中, Nd:YVO₄ 晶体表面温度保持在略低于室温的水平; 耦合输出镜的凹面镀膜, 曲率半径为 100 mm , 对 1064 nm 透过率大于 60% ; 用滤波片以滤掉剩余抽运光; 作为输入镜的 Nd:YVO₄ 晶体前端面距离输出镜约 250 mm , 端镜 11 置于一维平移台上, 可沿倍频

光输出方向一维平移, 距离输出镜约 163 mm。

采用 II 类非临界相位匹配的 LBO 晶体腔内倍频, LBO 沿 z 轴切割, 尺寸 3 mm × 3 mm × 17 mm, 两端亦镀 1342 nm 和 671 nm 双色增透膜。侧面用铝箔

包住置于紫铜夹具内, 由电阻丝加热, 通过控制电阻丝的电压改变加热功率来控制 LBO 晶体的温度, 温度控制精度 0.2 °C。

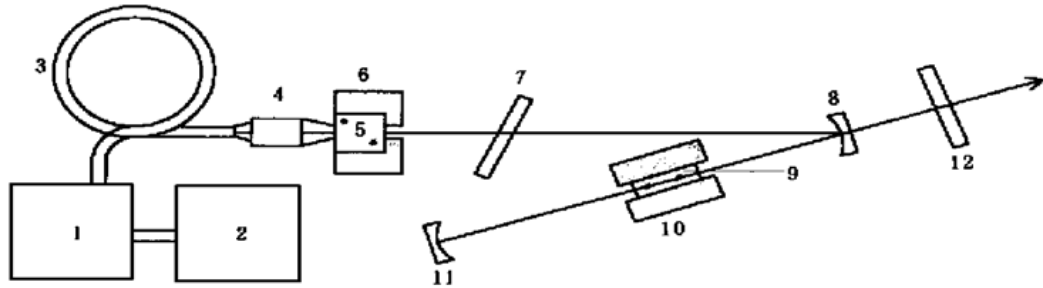


Fig. 3 Schematic of the experimental configuration. 1: laser diode; 2: temperature controller; 3: fiber; 4: couplingsystem; 5: Nd: YVO₄ and M₁; 6: copper heatsink; 7: Brewster plate; 8: output mirror; 9: LBO crystal; 10: LBO crystal temperature controller; 11: mirror; 12: filter

室温下, 首先在抽运功率较小且不加 LBO 晶体时, 调节好谐振腔, 此时在倍频光的输出方向上漏出一部分基频光。加入 LBO 晶体(置于输出镜与端镜之间的束腰位置)后, 通过仔细调节, 可直接观察到微弱的红光输出。调整晶体温度, 并使之稳定在非临界相位匹配温度, 改变抽运光功率, 得到 II 类非临界相位匹配的 LBO 腔内倍频的 671 nm 激光输入-输出特性曲线, 如图 4。在抽运功率(光纤出口处功率)为 12.6 W 时, 红光输出达到 890 mW, 光-光转换效率 7%。如果计及耦合系统 90% 的传输效率, Nd: YVO₄ 晶体表面对抽运光 10% 的反射损耗, 则转换效率达到 8.7%。考虑到输出镜另一方向的几十毫瓦红光输出, 以及耦合输出镜对 671 nm 高达 10% 的反射率, 则产生的红光将达到 1 W 以上, 转换效率将达到 10%。

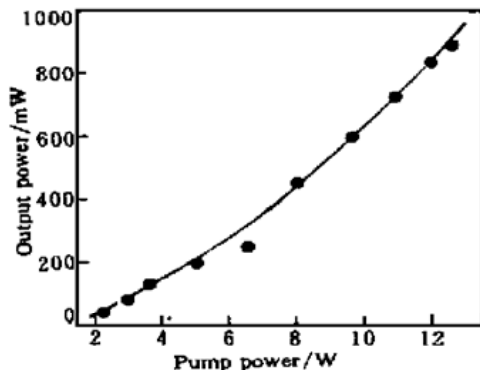


Fig. 4 Output power at 671nm as a function of pump power.

890 mW was obtained at 12.6 W incident power

在 400 mW 输出时, 对红光输出稳定性进行了测量, 10 分钟不稳定性小于 ±2%。输出为单横模, 四周有杂散光。阈值约 1 W。

结论 通过对激光晶体热透镜效应的考虑, 设计了

热不灵敏腔; 采用较大的抽运光斑和钕离子掺杂浓度较低的晶体, 最高获得了 890 mW 红光输出。同时, II 类非临界相位匹配 LBO 腔内倍频与 KTP II 类临界相位匹配腔内倍频^[9]相比, 因为是非临界相位匹配而没有走离角, 所以可以在允许的范围内使用较长的晶体以提高倍频转换效率; 与 LBO I 类非临界相位匹配腔内倍频^[10]相比较, 其匹配温度较高(约 40 °C)而避免 I 类非临界相位匹配下由于低温而结雾的现象, 且倍频的有效非线性系数基本相当, 因此其应用前景最为优越。

本工作是在中科院物理所光物理实验室完成的, 在此对徐瑶副研究员、陈毓川博士等的帮助和讨论表示感谢。

参 考 文 献

- [1] Bosenberg W R, Alexander J I, Myers L E *et al.*. 2.5 W continuous-wave, 629 nm solid-state laser source. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(3): 207~ 209
- [2] Lincoln J R, Ferguson A I. All-solid-state intracavity-doubled Nd: YLF laser producing 300 mW of 659 nm light. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(16): 1213~ 1215
- [3] Huo Yujing, Shen Dezhong, Li Gansheng *et al.*. LD pumped red lasers and its application in Cr: LiSAF laser. *Proc. SPIE*, 1996, **2889**: 240~ 243
- [4] Tucker A W, Birnbaum M, Fincher C L *et al.*. Stimulated-emission cross section at 1064 and 1342 nm in Nd: YVO₄. *J. Appl. Phys.*, 1977, **48**(5): 4907~ 4911
- [5] Chai B H T. Recent development of high efficiency Nd miniature laser host materials. Becker Joseph F, Tam Andrew C, Gruber John B, Lui Lam, eds. *Novel Laser Sources and Applications*. Washington: SPIE Optical Engineering Press, 1993. 5~ 18
- [6] 王长青, 沈德元, 卢建仁等. 激光二极管抽运的 1.3 μm

- 及其腔内倍频红光 Nd: YVO₄ 激光器. 中国激光, 1997, **A24**(7): 577~ 580
- [7] Conroy R S, Kemp A J, Friel G J *et al.*. Microchip Nd: vanadate lasers at 142 and 671 nm. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(23): 1781~ 1783
- [8] Agnesi A, Reali G C, Gobbi P G. 430-mW single-transverse-mode diode-pumped Nd: YVO₄ laser at 671 nm. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1998, **QE-34**(7): 1297~ 1300
- [9] He Jingliang, Zhang Hengli, Hou Wei *et al.*. Generation of CW radiation of 273 mW at 671 nm from a diode-pumped intracavity-doubled Nd: YVO₄ laser. *Chin. Phys. Lett.*, 1998, **15**(5): 343~ 344
- [10] 张恒利, 何京良, 侯 玮等. 激光二极管抽运 Nd: YVO₄ 晶体 1342 nm 和 671 nm 激光器研究. 物理学报, 1998, **47**(9): 1579~ 1584
- [11] 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~ 1833
- [12] 吕百达 著. 激光光学, 成都: 四川大学出版社, 第二版, 1992. 292~ 295

Study of an Efficient Nd: YVO₄ Red Light Laser Pumped by Laser Diode

Zhang Hengli¹⁾ Zhu Naiyi¹⁾ Yang Qiansuo¹⁾ Yu Xilong¹⁾
 Hou Wei²⁾ Xu Zuyan²⁾ Wu Baichang³⁾

- 1), *Laboratory of High Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080*
 2), *Laboratory of Optical Physics, Institute of Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080*
 3), *Fujian institute of Research on the Structure of Matter, The Chinese Academy of Sciences, Fuzhou, 350002*

(Received 18 October 1999; revised 13 December 1999)

Abstract A high power LD end-pumped Nd: YVO₄ intracavity frequency-doubled 671 nm laser is demonstrated. A thin lens model is introduced to design a thermally-insensitive cavity. The output power of 890 mW at 671 nm is achieved with a type-II noncritical phase-matched (NCPM) LBO crystal.

Key words: laser diode; pump; intracavity frequency-doubling