

LD 泵浦 Nd : YVO₄ 晶体 KTP 腔内 倍频红光激光器

张恒利¹ 竺乃宜¹ 杨乾锁¹ 何京良² 侯 玮³ 许祖彦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 山东师范大学物理系, 济南 250014)

(3 中国科学院物理研究所光物理实验室, 北京 100080)

摘 要 报道了激光二极管泵浦 Nd : YVO₄ 晶体, II 临界相位匹配 KTP 晶体腔内倍频红光激光器. 通过对激光晶体热效应的考虑, 设计了热不灵敏腔, 最大获得了 273mW 671nm 红光输出.

关键词 激光二极管; 泵浦; 腔内倍频

0 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 类晶体的泵浦源. 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. 通过光参量和和频过程, Bosenberg¹ 等利用周期性超晶格铌酸锂 (PPLN) 得到 2.5W 红光激光输出, 但该系统技术复杂, 且 PPLN 难加工, 厚度小, 成品率低, 目前还难以实用化.

倍频钕离子的 1.3μm 谱线上得到红光的一种有效途径. Nd : YVO₄ 晶体也已被证明是获得全固态红光的最优秀的激光晶体之一^{2~5}. 本文报道了在激光二极管泵浦 Nd : YVO₄ 晶体, II 临界相位匹配 KTP 晶体腔内倍频红光激光器中, 通过对激光晶体热效应的考虑, 设计了热不灵敏腔, 最大获得 273mW 的 671nm 红光输出.

1 激光晶体的热透镜效应

在高功率 LD 端面泵浦固体激光器中, 激光晶体的热效应是阻碍获得高效率、高功率输出的一个重要因素. 这里我们主要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. 在较大的泵

浦功率变化范围内, 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.

对连续端面泵浦的情况, 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一定温度. 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⁶

$$f = \frac{\pi K_c \omega_p^2}{P_{th} (dn/dT)} \left(\frac{1}{1 - \exp(-al)} \right) \quad (1)$$

式中 $a = 1/\text{mm}$ 为吸收系数, $l = 5\text{mm}$ 为晶体通光长度, P_{th} 为转化为热的泵浦功率, ω_p 泵浦光斑尺寸, $K_c = 5.2\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ 为晶体热导率, $dn/dT = 4.7 \times 10^{-6}/\text{K}$ 为晶体折射率的温度变化系数.

由于忽略热效力和形变的影响, 实际的热焦距比上式求得的要小一些, 也即热致屈光度 ($D = 1/f$ (单位: $1/\text{m}$)) 要大一些. 从上式中, 可以看出泵浦光斑尺寸对热焦距的影响是很大的. 所以适当加大泵浦光斑尺寸, 可以有效地减小热透镜效应的影响.

2 激光晶体热透镜效应对折叠腔参数的影响

为提高倍频光的转换效率和输出功率,我们采用折叠腔进行了倍频研究.在不考虑象散时,折叠腔可以展开为多元件直腔来进行分析⁷.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,在一定的泵浦功率下,根据式(1),可求得其热焦距,所以可将其等效为一曲率半径为: $\rho_2=2f$ (f 为 Nd:YVO₄ 晶体热透镜焦距)的凹面镜.

以镜 Nd:YVO₄ 晶体前端面为参考,三镜折叠腔展开为多元件直腔进行分析,如图 1 所示.

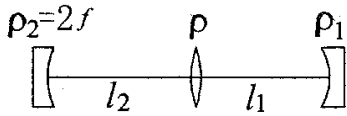


图 1 在用 LBO 腔内倍频时折叠腔的等效腔

Fig. 1 The equivalent cavity of a folded-cavity

以 G 参量等价腔分析法进行分析和数值计算.设腔镜曲率半径分别为 $\rho_1, \rho(=2f), \rho_2(=2f_{th})$, 各分臂长为 $l_1, l_2, l_1+l_2=L$ (腔长). 倍频晶体处的光斑半径为

$$\omega_{02}^2 = \pm \frac{\lambda B \sqrt{4 - (A+D)^2}}{2\pi(1-AD)} = \pm \frac{\lambda b \sqrt{G_1 G_2 (1 - G_1 G_2)}}{\pi(G_1 + a^2 - 2a G_1 G_2)} \quad (2)$$

激光介质处的束腰为

$$\omega_{01}^2 = \pm \frac{\lambda b \sqrt{G_1 G_2 (1 - G_1 G_2)}}{\pi(G_2 + d^2 G_1 - 2d G_1 G_2)} \quad (3)$$

式中

$$\begin{cases} G_1 = a - \frac{b}{\rho_1} = 1 - \frac{l_2}{f} - \frac{L}{\rho_1} + \frac{l_1 l_2}{f \rho_1} \\ G_2 = d - \frac{b}{\rho_2} = 1 - \frac{l_1}{f} - \frac{L}{\rho_2} + \frac{l_1 l_2}{f \rho_2} \end{cases} \quad (4)$$

图 2 为在不同的腔长和热致屈光度下,采用 KTP 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 ω_1 为激光晶体处束腰, ω_2 为倍频晶体处束腰;横坐标 D 为屈光度, L 为倍频晶体所在部分的腔长(图 2 中 l_2). 计算时取 $l_1=250\text{mm}$, $\rho_1=\rho=100\text{mm}$, 我们可以看出,在 $L=62\text{mm}$ 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.这就为我们通过选择合适的腔长以得到热不灵敏腔提供了理论依据.

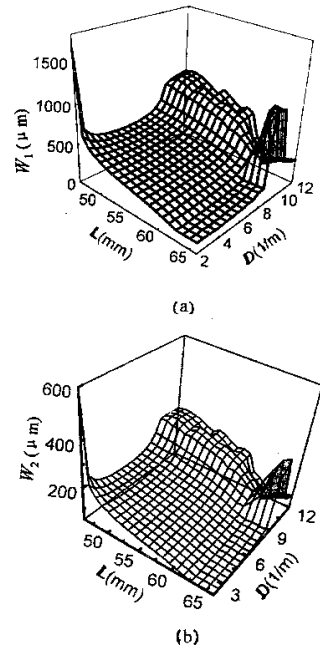


图 2 不同分臂长时,激光晶体(ω_1)和倍频晶体处(ω_2)束腰随热致屈光度的变化关系.a:激光晶体处;b:KTP 晶体处基频光束腰大小

Fig. 2 Waists at laser material and nonlinear crystal are shown as a function of cavity length and thermally induced lens

3 实验装置和结果

实验中所用 LD 为美国 SDL 公司出品的光纤输出模块,型号为 SDL-3450-P5,最大输出功率 10W,光纤输出口径 $400\mu\text{m}$,数值孔径 0.42. 该系统用国产型恒温循环器进行温度控制.KTP 晶体为 Π 匹配切割,其快轴与 Nd:YVO₄ 晶体的 c 轴成 45° 放置. 谐振腔示意图如图 3 所示. 图中作为输入镜的 Nd:YVO₄ 晶体前端面距离耦合输出镜约 250mm,腔镜 6(置于一维平移台上,可沿倍频光输出方向一维平移)距离耦合输出镜约 63mm,在加入 KTP 晶体后,须适当拉长镜 6 与镜 4 的距离. 在测量时用滤波片滤去基频光.

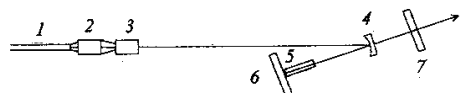


图 3 折叠腔 LD 泵浦 Nd:YVO₄ 晶体,KTP 腔内倍频 671nm 激光器装置图.1:光纤;2:耦合系统;3:Nd:YVO₄ 晶体及输入镜 M1;4:耦合输出镜;5:KTP 晶体;6:腔镜;7:滤波片

Fig. 3 Schematic of the experimental configuration. 1: fiber; 2: coupling system; 3: Nd:YVO₄ and M1; 4: output mirror; 5: KTP; 6: mirror; 7: filter

3.1 两种不同长度 KTP 晶体的倍频结果

首先对掺杂 0.7at% 的 Nd:YVO₄ 晶体采用两种长度不同的 KTP 晶体进行了腔内倍频. Nd:YVO₄ 晶体尺寸(3×3×5)mm³. KTP 晶体截面尺寸都是 3×3mm², 通光长度分别为 3mm 和 5mm. 都为 II 类相位匹配切割, 端面皆镀对 1342nm 和 671nm 双色增透膜. 实验结果如图 4, 图中实点为实验结果, 曲线为二次拟合曲线. 在 4.4W 泵浦时, 在 3mm 和 5mm 长的 KTP 晶体上得到的倍频红光功率分别为 96mW 和 146mW. 5mm 长的 KTP 晶体的倍频效果明显优于 3mm 长的晶体. 用 KTP 晶体倍频 1342nm 时, 走离角很大, 约 2.5°, 在光斑直径 100μm 时, 有效作用长度仅为 1.2mm. 这与当晶体长度大于有效作用长度时, 倍频光与倍频晶体的长度成正比基本一致³.

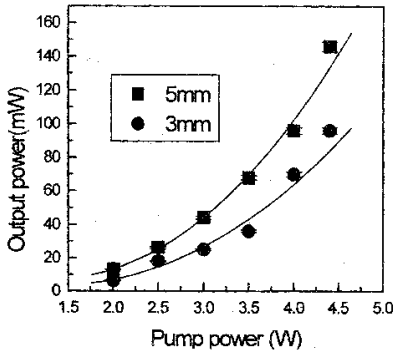


图 4 采用长度分别为 3mm 和 5mm 的 KTP 晶体腔内倍频 671nm 激光输入输出特性

Fig. 4 Red light output versus pump power with 3mm and 5mm long KTP

3.2 两种不同掺杂浓度 Nd:YVO₄ 晶体 KTP 腔内倍频结果

采用两种掺杂浓度分别为 0.7at% 和 1at% 的 Nd:YVO₄ 晶体, 利用同上面相同的装置, 皆采用 5mm 长的 KTP 晶体进行了腔内倍频实验. 两块 Nd:YVO₄ 晶体尺寸、切割皆相同. 实验结果如图 5. 图中实点为实验点, 曲线为二次拟合曲线.

利用 0.7at% 的 Nd:YVO₄ 晶体和 5mm 长

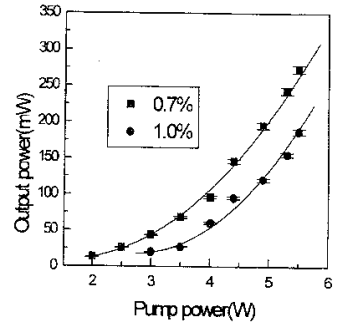


图 5 采用掺杂浓度分别为 0.7at% 和 1% 的 Nd:YVO₄ 晶体和 5mm KTP 晶体腔内倍频 671nm 激光输入输出特性

Fig. 5 Red light output versus pump power with different Nd concentration YVO₄ crystals

的 KTP 晶体腔内倍频, 得到 273mW 的 671nm 激光输出, 光-光转换效率约 5%. 在 150mW 输出时, 对稳定性进行了测量, 10 分钟不稳定性小于 2%. 输出为基横模, 四周有杂散光.

4 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; 采用较大的泵浦光斑和钕离子掺杂浓度较低的晶体得到了较好的实验结果, 最大获得了 273mW 红光输出. 与 I 类及 II 类非临界相位匹配 LBO 腔内倍频² 相比(我们利用 I 类及 II 类非临界相位匹配 LBO 腔内倍频分别获得了超过 500mW 和 400mW 的红光输出), 虽然因为走离角较大, 倍频效率和输出功率相对较低, 但是倍频晶体不需要进行严格的温度控制, 装置比较简单, 因而对于输出功率要求不太大的情况(从 mW、×10mW 量级到 100mW), 利用 KTP 晶体进行腔内倍频获得红光不失为一种简单而可行的方法.

本工作是在中科院物理所光物理实验室完成的, 在此向徐瑶副研究员、陈毓川博士和房晓俊博士等的帮助和讨论表示感谢; 实验中所用 KTP 晶体为山东大学晶体材料研究所生长加工, 在此向王继扬教授的支持和帮助表示感谢.

参考文献

- 1 Bosenberg W R, Alexander J I, Myers L E, et al. Opt Lett, 1998, 23(1): 207~209
- 2 张恒利, 何京良等, 侯玮等. 半导体激光泵浦 Nd:YVO₄ 激光器的 1.34μm 输出特性. 中国激光, 1999, 26(6): 481~485
- 3 张恒利, 何京良, 陈毓川等. 激光二极管抽运 Nd:YVO₄ 晶体 1342nm 和 671nm 激光器研究. 物理学报, 1998, 47(9): 1579~1584

- 4 Agnesi A, Reali G C, Gobbi P G. 430-mW single-transverse-mode diode-pumped Nd : YVO₄ laser at 671nm. IEEE J QE, 1998, 34(4): 1297~1301
- 5 张恒利, 侯玮, 王健明等. II 类非临界相位匹配 LBO 腔内倍频 LD 泵浦 Nd : YVO₄ 671nm 激光器, 科学通报, 1999, 44(7): 711~713
- 6 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(7): 1831~1833
- 7 吕百达. 激光光学(第二版). 成都: 四川大学出版社, 1992: 292~295
- 8 Boyd G D, Kleinman D A. Parametric interaction of focused gaussian light beams. J Appl Phys, 1998, 39(8): 3597~3639

LD PUMPED Nd : YVO₄/KTP RED LIGHT LASER

Zhang Hengli¹, Zhu Naiyi¹, Yang Qiansuo¹, He Jingliang², Hou Wei³, Xu Zuyan³

¹ *Laboratory of High Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*

² *Department of Physics, Shandong Teachers University, Jinan 250014, China*

³ *Laboratory of Optics Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*

Received date: 1999-11-22

Abstract It is demonstrated a high power LD end-pumped Nd : YVO₄/KTP intracavity frequency-doubled 671nm laser. A thin lens model is introduced to design a thermally-insensitive cavity. The output power of 273mW at 671nm is achieved.

Keywords Laser diode; Pump; Intracavity frequency doubling

Zhang Hengli was born in Aug. 1968 in Shandong province, received the Master degree in Institute of Crystal Materials, Shandong University in 1996, and the Ph. D. degree in Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences. He has been working in the technology of all-solid-state lasers and frequency conversion in the past several years, and now is working as Post doctor in Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences.