

文章编号:1002-2082(2008)01-0067-05

LD 抽运的折叠腔 Nd : YVO₄/KTP 倍频红光激光器

王娟娟, 王加贤

(华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 泉州 362021)

摘 要: 对LD 端面抽运的Nd : YVO₄/KTP 腔内倍频激光器的三镜折叠腔结构进行优化设计,研究了总腔长、输入镜曲率半径和Nd : YVO₄ 和KTP 晶体的热效应对激光谐振腔的稳定区域、Nd : YVO₄ 晶体内基模光束半径的影响。实验结果表明:该方法所得出的结论与理论相吻合。在实验中比较了折叠腔不同折叠角度的红光输出功率,并获得了最佳折叠角度为 25°,其有效倍频效率为 10.8%。最后使用基频光的偏振特性与KTP 的相位匹配之间的关系对实验结果进行理论解释。

关键词: Nd : YVO₄ 激光器;KTP 晶体;折叠腔

中图分类号: TN248.1

文献标志码: A

LD-pumped Nd : YVO₄/KTP frequency-doubled red laser with folded resonator

WANG Juan-juan, WANG Jia-xian

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

Abstract: The structure of the 3-mirror folded resonator was optimized for Laser-diode end-pumped Nd : YVO₄/KTP intracavity frequency-doubled laser. The influence of parameters including the resonator length, curvature radii of mirrors, Nd : YVO₄ and KTP thermal effect on the stable area of the laser resonator and the basic mode size of Nd : YVO₄ crystal was investigated. The research shows that the experiment result is consistent with that of the theoretical analysis. The red laser output powers at different folded angles of the folded resonator were compared, the effective frequency-doubled efficiency of 10.8% was obtained at the optimal folded angle 25°. The experimental result was explained theoretically with the relation between the polarization property of the fundamental laser beam and the phase matching of KTP.

Key words: Nd : YVO₄ laser; KTP crystal; folded cavity

引言

大功率红光激光器在激光医疗^[1]、彩色显示等领域有广阔的应用前景,也可作为 Cr : LiSAF 可调谐激光器的泵浦源。目前,实现连续红光输出的

方法主要有红光激光二极管(LD)、参量和频方法以及对掺 Nd³⁺ 固体激光器的 1.3 μm 波长进行倍频等。虽然红光LD 的功率已有较大提高,但存在发散角大、光束质量差、线宽大、输出波长及功率随温

收稿日期:2007-05-23; 修回日期:2007-06-15

基金项目:福建省自然科学基金(A0610023);国务院侨办科研基金(05QZR11)

作者简介:王娟娟(1983—),女,福建泉州人,华侨大学硕士,主要从事固体激光技术与器件研究。

E-mail:qzcuckoo@hqu.edu.cn

度漂移等缺点。Bosenberg 等人利用周期性超晶格铌酸锂(PPLN)通过参量和频得到 2.5 W 红光输出^[2],但系统技术复杂,难以实用化。对于 Nd:YVO₄ 的 1 342 nm 激光倍频,目前国内研究不多。山东大学用 1 W 的 LD 抽运 Nd:YVO₄/KTP 腔内倍频激光器实现了 3.6 mW 的红光输出^[3];中国科学院物理研究所用 10 W 的 LD 抽运 Nd:YVO₄ 激光器,采用 II 类临界相位匹配 KTP 倍频,实现了 70 mW 的 671 nm 激光输出^[4];该所还用 10 W 的 LD 抽运折叠腔结构的 Nd:YVO₄ 激光器,采用 I 类温度匹配 LBO 进行腔内倍频,实现了 502 mW 的 671 nm 激光输出,光-光转换效率超过 8.3%^[5];郑权和檀慧明等人比较了 I 类、II 类临界相位匹配方式下 LBO 腔内倍频 Nd:YVO₄ 晶体,当抽运功率为 800 mW 时,红光输出功率分别为 97 mW 和 52 mW^[6]。LBO 的腔内倍频效率较高,但它对温度变化仍然很敏感,其输出功率抖动比较大。笔者采用不需要进行严格温度控制的 KTP 晶体倍频 Nd:YVO₄ 激光器产生 671 nm 激光,并从理论上分析其折叠腔结构,研究总腔长、输入镜曲率半径、Nd:YVO₄ 及 KTP 热效应对倍频效率的影响,在实验过程中获得了折叠腔的最佳折叠角度,为红光激光器的研究和开发提供了理论依据。

1 理论分析与计算

众所周知,掺 Nd³⁺ 激光增益介质对其倍频光具有很强的吸收。在图 1 所示的三镜折叠腔结构中,倍频光不经过激光增益介质,避免了它对倍频光的吸收,也降低了热效应。在激光腔设计中考虑了 Nd:YVO₄ 和 KTP 的热透镜效应,其中 Nd:YVO₄ 的等效热透镜焦距为 f_t ,KTP 的等效热透

镜焦距为 f_k 。Nd:YVO₄ 的端面到 M₁ 的距离为 l_1 ,到 M 的距离为 l_2 ,KTP 紧贴 M₂,其端面到 M 的距离为 l_3 。实验中 M₁ 的曲率半径 $R_1=2\ 000\text{ mm}$ 和 500 mm, M₂ 为平面镜。为了消除像散的影响,折叠镜 M 为平面镜^[7]。

考虑 Nd:YVO₄ 和 KTP 晶体的热透镜效应后,以 M₁ 镜为参考面的单程传输矩阵为

$$m = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} = (tyag2) \begin{bmatrix} 1 & l_3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times (tyag1) \begin{bmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$(tyag1) = \begin{bmatrix} 1 & h_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & h_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$(tyag2) = \begin{bmatrix} 1 & h_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_k & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & h_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

式中: $h_1=8/2n_1$, $h_2=5/2n_2$ 分别是长度为 8 mm 的 Nd:YVO₄ 晶体和长度为 5 mm 的 KTP 晶体主平面到各自端面的距离; $n_1=2.15$, $n_2=1.71$ 分别为二者的线性折射率^[4-5]。以 M₁ 为参考面的往返变换矩阵为

$$M = \begin{bmatrix} d & b \\ c & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -2/R_1 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

由文献[8]知道, Nd:YVO₄ 的等效热透镜焦距 f_t 的大小为

$$f_t(p) = \frac{\pi k_c \omega_p^2}{dn/dT \eta \xi P_{in}} \quad (3)$$

式中: P_{in} 为晶体端面处的抽运功率; ω_p 为抽运光在晶体内的平均半径; $\eta=1-e^{-\alpha d}$ 为吸收系数为 α 的晶体吸收率; d 为晶体长度; ξ 为热负荷比,即晶体中吸收的抽运能量转为热能量的比例,通常情况下约有 10% 转化为热; K_c 为晶体的热导率; dn/dT 为折射率随温度的变化率。参照文献[8],计算时取参数 $K_c=0.054\text{ W/cm}\cdot\text{K}$, $dn/dT=(4.67\pm0.6)\times10^{-6}/\text{K}$, $\alpha=8.8\text{ cm}^{-1}$, $d=8.0\text{ mm}$ 。KTP 的热透镜效应源于折射率随温度的变化,有 $f_k=\gamma A/P_a(0.5dn/dT)^{-1}$ ^[7](其中 $\gamma=3.3\text{ W/m}\cdot\text{K}$ 为 KTP 的热导率, A 为晶体光束的截面面积, P_a 为 KTP 晶体吸收的基频光功率, $dn/dT=1.6\times10^{-5}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 为折射率的温度系数)。鉴于 KTP 晶体对基波的吸收是倍频波吸收的 10 倍以上,故笔者认为 KTP 的热透镜效应主要由基波的吸收引起。

1.1 仅考虑 Nd:YVO₄ 热效应对激光器的影响
暂不考虑 KTP 的热透镜效应,此时令 L 为总

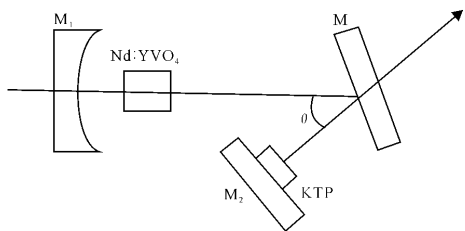


图 1 折叠腔 Nd:YVO₄/KTP 倍频激光器

Fig. 1 Nd:YVO₄/KTP frequency-doubled laser with folded resonator

腔长,腔参数的选取不仅要满足腔的稳定性条件,还应满足:1) Nd:YVO₄晶体内的基模光束半径 ω_1 比晶体KTP内的基模光束半径 ω_2 大,以提高基频光的倍频转换效率;2)为了减小伴随热透镜所产生的高阶球差引起的附加衍射损耗,要求晶体Nd:YVO₄内的基模光束半径 ω_1 应略小于抽运光束半径 ω_p ,这样有利于获得TEM₀₀模输出;3)总腔长 L 不应过长,否则衍射损耗和失调灵敏度将会加大。

利用传输矩阵及熟知的等效G参数法,令 $l_1=3\text{ mm}$,输入镜曲率半径为 $R_1=500\text{ mm}$ 和 $2\,000\text{ mm}$,总腔长 $L=100\text{ mm}$ 和 200 mm ,从理论上计算Nd:YVO₄晶体内的基模光束半径 ω_1 与抽运功率的关系,如图2所示。从图2可看出,较大的 R_1 值和较小的 L 值更有利于激光谐振腔在较高抽运功率下处于稳定区域。随着 R_1 减小和 L 增大,激光谐振腔的稳定区域向低抽运功率区移动;但是 L 的减小与 R_1 的增大也将使2个晶体内的基模光束半径减小。由文献[5]可以知道,腔内倍频输出功率与倍频晶体内的基模光束半径成反比,即基频光束半径越小,越容易获得高功率倍频激光输出,但聚焦点也不是越小越好,而是存在一聚焦函数。对于倍频晶体KTP,最佳聚焦点光束大小约为几十个 μm ,而增益介质处腔模半径大约几百 μm 。由此可见,不同的 l_1,L,R_1 影响谐振腔的稳定区域和2个晶体的基模光束半径大小,但对两者的影响是相悖的。为了增加倍频转换效率,在设置谐振腔参数的时候应根据不同要求进行取舍。

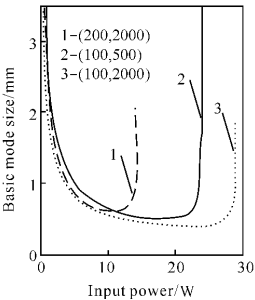


图2 Nd:YVO₄晶体内的基模光束半径 ω_1 与抽运功率的关系

Fig. 2 Basic mode size in Nd:YVO₄ crystal versus input power for different cavity parameters

综合以上几个因素及具体实验条件,选取总腔长为 $L=100\text{ mm}$, $R_1=2\,000\text{ mm}$ 。此时腔型为良

好的热稳定腔,当改变抽运功率使激光晶体的热焦距发生变化时,谐振腔仍然是稳定腔。

1.2 KTP热效应对激光器的影响

为了分析 f_k 对谐振腔稳定性的影响,选取 $L=100\text{ mm}$, $R_1=2\,000\text{ mm}$,分别计算了不考虑KTP热焦距和考虑KTP热焦距时Nd:YVO₄晶体内的基模光束半径 ω_1 随抽运功率的变化,如图3所示(虚线对应 $f_k\rightarrow\infty$,实线对应 $f_k=20f_t$)。从图3可以看出,考虑 f_k 较之不考虑其影响时谐振腔稳定区的变化不大,基模光束半径也相差甚少。所以,在KTP倍频Nd:YVO₄实验中,只要对KTP采用合适稳定的致冷和控温装置,即可减弱KTP热效应对倍频效率的影响。

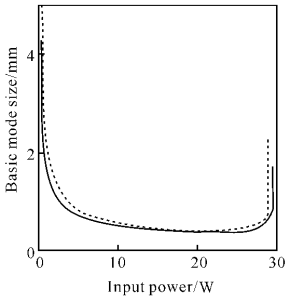


图3 Nd:YVO₄晶体内基模光束半径 ω_1 与抽运功率的关系

Fig. 3 Basic mode size in Nd:YVO₄ crystal versus input power

2 实验结果与分析

实验采用图1所示装置。其中LD输出耦合光纤的芯径为 $600\text{ }\mu\text{m}$,数值孔径 $\text{NA}=0.22$,抽运激光经准直和聚焦透镜后耦合效率约为90%。LD在 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 时激光发射中心波长为 $(808\pm3)\text{ nm}$,这样可有效保证发射中心波长与Nd:YVO₄的吸收峰匹配。用Molelectron Detector公司的功率计测量输出激光功率,实验中的Nd:YVO₄晶体采用a向切割,尺寸为 $4\text{ mm}\times4\text{ mm}\times8\text{ mm}$,Nd离子掺杂浓度约为0.5%,2个通光面镀上808 nm和1 342 nm激光增透膜,以减小腔内的反射损耗。在激光器运行过程中,Nd:YVO₄晶体采用循环水冷却。输入镜 M_1 镀有对 $1.34\text{ }\mu\text{m}$ 全反射和对808 nm高透射的膜,折叠镜M为对 $1.34\text{ }\mu\text{m}$ 高反射和对671 nm高透射的平面镜。为了抑制Nd:YVO₄晶体中增益最强的 $1.06\text{ }\mu\text{m}$ 谱线起振,平面镜 M_2 镀有既对

1.34 μm 和 671 nm 高反射,又对 1.06 μm 高透射的膜。所用 KTP 晶体的尺寸为 5 mm $\times$ 5 mm $\times$ 5 mm,切割角度为 $\varphi=0^\circ$, $\theta=59.1^\circ$,两面均镀有对 1.34 μm 和 671 nm 波长的双色增透膜。另外,实验中在晶体与水循环金属座之间裹有一层铝箔,以达到紧密接触的目的。

要确定 KTP 晶体的腔内倍频效率,必须测量出腔内基频光循环功率。腔内循环功率只有通过测量 M 或 M_2 漏出的基频光来间接确定。然而, M 和 M_2 对基频光的透过率一般都低于 0.3%,如此低的透过率要精确测量是比较困难的,也就难以准确测定腔内基频。所以我们引入有效倍频效率的概念来确定 KTP 晶体的腔内倍频效率^[9]。有效倍频效率定义为,倍频输出功率与同一抽运功率下基频运转时的最大可能输出功率之比。在测量基频光输出功率时,尽可能维持激光器其他条件不变。实验分 2 步进行:第 1 步将 M_2 换成对 1.34 μm 波长光的透过率为 8% 的平面镜(通过比较,透过率为 8% 的平面镜对应的输出功率最大),并使 KTP 晶体的通光面与光轴平行,使其完全不满足 II 类相位匹配条件,从而不发生倍频相互作用,这样不仅可使谐振腔的腔参数保持不变,而且 KTP 的插入损耗也得以保留,进而可得到基频光的输出功率;第 2 步再把 M_2 换成对 1.34 μm 和 671 nm 波长光高反射,又对 1.06 μm 光高透射的平面镜,精确调整 KTP 晶体的位置,实现倍频光从折叠镜 M 输出。改变图 1 中的折叠角 θ ,仔细调整谐振腔,当折叠角度为 25° 时,获得的最大倍频红光输出功率为 50 mW,此时同一抽运功率下所对应的基频光功率为 463 mW,有效倍频效率为 10.8%。在折叠角度保持 25° ,其他实验条件不变的情况下,实验中分别采用曲率半径为 $R_1=2\,000\text{ mm}$ 或 $R_1=500\text{ mm}$ 的输入镜和总腔长为 $L=100\text{ mm}$ 或 $L=130\text{ mm}$ 来测量相应红光输出功率,结果如图 4 所示。实验结果表明:曲率半径越大,总腔长越短,输出功率越高;随着总腔长的减小和曲率半径的增大,输出功率随抽运功率线性增加的范围越大。由于热效应影响,随着抽运功率的进一步增大,输出功率反而下降,这与理论分析结果吻合。图 5 是用 USB4000 微型光纤光谱仪测得的倍频红光输出光谱。由此可见,输出光只有倍频光,且光谱宽度很窄,大约为 2 nm。

另外,在总腔长基本不变的前提下,比较了不同折叠角对应的基频光与倍频光的最大输出功率,如表 1 所示。我们知道,菲涅尔公式定量描述了电

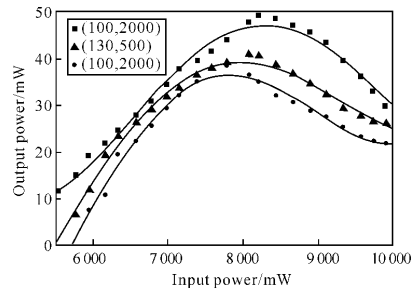


图 4 输出红光与抽运功率的关系

Fig. 4 Output power versus input power for different cavity length and curvature radii of mirrors

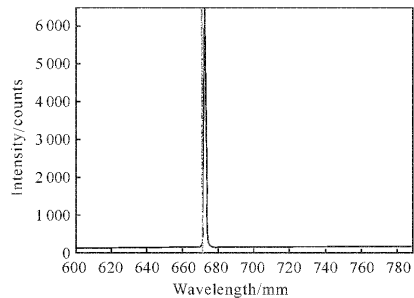


图 5 输出红光的光谱图

Fig. 5 Spectrum of red laser

矢量中的 S 分量和 P 分量振幅经过介质界面反射后的变化,折叠镜镀膜时引入了多光束干涉,使得 2 个分量的反射率随折叠角变化更明显^[10]。笔者在实验中采用的折叠镜的反射率是在入射角为 0° 时获得的,随着折叠角的增大,基频光的反射光强有所减小。因此,尽可能减小折叠角可以使基频光输出较大。但是后来发现,并不是基频光输出功率越大,倍频光的输出功率也越大,而是有一个最佳的折叠角度。在本设计的谐振腔中,折叠角度取 25° 最好,这主要和基频光的偏振特性与 KTP 的相位匹配之间的关系有关。Nd:YVO₄ 输出的基频光具有良好的线偏振特性,当折叠角不等于 0° 时,它经过折叠镜 M 反射。光与 e 光的反射率不同,所以出射光在 2 个方向上的分量发生了改变。虽然随着折叠角的增大,基频光功率下降,但由于能满足 KTP 晶体的相位匹配条件的偏振光分量增加,所以倍频光功率反而上升。随着折叠角进一步增大,基频光功率下降,倍频光功率也随之下降。所以,折叠腔内腔倍频的激光器需要选择一个最佳折叠角来提高倍频效率。

表1 折叠角与倍频光的关系

Table 1 The relation of folded angle and frequency-doubled laser

折叠角/(°)	基频光/mW	倍频光/mW	有效倍频效率/%
16	530	35.8	6.7
20	517	37	7.2
25	463	50	10.8
30	447	45	10.0
35	424	31	73.0

3 结论

本文在引入Nd:YVO₄晶体的热透镜效应情况下,从理论上对三镜折叠腔的腔型结构进行了设计和选择,研究了不同总腔长、输入镜曲率半径对谐振腔的稳定区域和Nd:YVO₄晶体基模光束半径的影响。实验所得结果与理论吻合。另外,在折叠角度为25°时,获得了最大倍频红光输出功率为50 mW,有效倍频效率为10.8%,并对基频光的偏振特性与KTP的相位匹配之间的关系进行了理论分析,为Nd:YVO₄倍频产生671 nm的红光激光器的研究和开发提供了理论依据。

参考文献:

[1] NING Xi-fa, YAO Jian-quan, WANG Peng, et al. Experimental studies of a four-wavelengths (1064/1319, 532/659 nm) Nd:YAG laser treatment machine[J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2002, 13(12):1311-1313. (in Chinese)

[2] BOSENBERG W R, ALEXANDER J I, MYERS L E, et al. Continuous 629 nm solid-state laser source [J]. J. of Opt. Lett., 1998, 23(1):207-209.

[3] 王长青, 沈得元, 卢建仁, 等. 激光二极管泵浦1.34 μm及其腔内倍频红光Nd:YVO₄激光器[J]. 中国激光, 1997, 24(7):577-5801.

WANG Chang-qing, SHEN De-yuan, LU Jian-ren, et al. LD-pumped 1.34 μm and intracavity frequency doubling Nd:YVO₄ red laser[J]. Chinese Journal of Laser, 1997, 24(7):577-5801. (in Chinese)

[4] 张恒利, 何京良, 侯玮, 等. LD泵浦的1.34 μm Nd:YVO₄晶体高效率激光器[J]. 中国激光, 1999, 26

(6):481-484.

ZHANG Heng-li, HE Jing-liang, HOU Wei, et al. Efficient LD-pumped 1.34 μm Nd:YVO₄ laser[J]. Chinese Journal of Laser, 1999, 26(6):481-484. (in Chinese)

[5] 张恒利, 何京良, 陈毓川, 等. 激光二极管抽运Nd:YVO₄晶体1342 nm和671 nm激光器研究[J]. 物理学报, 1998, 47(9):1579-1584.

ZHANG Heng-li, HE Jing-liang, CHEN Yu-chuan, et al. Research of LD-pumped Nd:YVO₄ laser in 1342 nm and 671 nm [J]. Physics Transaction, 1998, 47(9):1579-1584. (in Chinese)

[6] 郑权, 檀慧明, 赵岭, 等. LD泵浦Nd:YVO₄晶体LBO临界相位匹配倍频671 nm激光器[J]. 高技术通讯, 2001(11):48-51.

ZHEN Quan, Tan Hui-ming, ZHAO Ling, et al. LD-pumped Nd:YVO₄ 671 nm laser with critical phase matching LBO [J]. High Tech. Communication, 2001(11):48-51. (in Chinese)

[7] 王鹏飞, 吕百达. 折叠腔参数对内腔倍频系统稳定性的影响[J]. 激光技术, 2003, 27(4):328-330.

WANG Peng-fei, Lü Bai-da. The influence of folded-resonator parameters on the stability of intracavity-frequency-doubled laser [J]. Laser Technology, 2003, 27(4):328-330. (in Chinese)

[8] INNOCENZI M E, YRUA H T, FINCHER C L, et al. Thermal modeling of continuous-wave end-pumped solid-state lasers [J]. Applied Physics Letters, 1990, 56:1831-1836.

[9] 刘均海, 许心光, 王长青, 等. 优质KTP晶体腔内有效倍频效率及损耗的研究[J]. 光电子·激光, 2000, 11(6):609-612.

LIU Jun-hai, XU Xin-guang, WANG Chang-qing, et al. Investigation of effective intracavity doubling efficiency and losses of high-quality KTP crystal[J]. Photoelectron Laser, 2000, 11(6):609-612. (in Chinese)

[10] 阎吉祥, 魏光辉, 哈流柱, 等. 矩阵光学[M]. 北京:兵器工业出版社, 1995.

YAN Ji-xiang, WEI Guang-hui, HA Liu-zhu, et al. Matrix optics [M]. Beijing: Enginery Industry Publishing Company, 1995. (in Chinese)